ANALES

DE LA

SOCIEDAD CIENTIFICA ARGENTINA

DIRECTOR: Cap. de Navío (R. E.) EMILIO L. DIAZ

ENERO-FEBRERO 1967 | ENTREGAS I-II — TOMO CLXXXIII

SUMARIO

BUENOS AIRES
AVDA. SANTA FE 1145

1967

SOCIEDAD CIENTIFICA ARGENTINA

ADVERTENCIA. — Los colaboradores de los Anales son personalmente responsables de la tesis sustentada en sus escritos. Los que deseen tirada aparte de 50 ejemplares de sus artículos, deben solicitarla por escrito. Art. 10 del Reglamento de los « ANALES » (modificado por la J. D. en su sesión de fecha 4 de Septiembre de 1941). Los escritos originales destinados a la Dirección de los « Anales », serán remitidos a la Gerencia de la Sociedad, Avenida Santa Fe 1145, a los efectos de registrar la fecha de entrega para luego enviarlos al señor Director.

Impreso en Imprenta Coni - Perú 684 - Buenos Aires - República Argentina

ANALES

DE LA

SOCIEDAD CIENTIFICA

ARGENTINA

DIRECTOR: Cap. de Navío (R. E.) EMILIO L. DIAZ

TOMO CLXXXIII

BUENOS AIRES
AVDA. SANTA FE 1145

1967

SERIE I: CIENCIAS, Nº 9

PREVISION DE LAS LLUVIAS DE OCTUBRE A DICIEMBRE EN LA ZONA AGROPECUARIA ARGENTINA

Por EMILIO L. DIAZ

RESUMEN

Se ha calculado una fórmula de regresión destinada a prever las perspectivas de las anomalías de las lluvias (en porciento respecto de la precipitación normal) de octubre, noviembre y diciembre, en la región agropecuaria argentina. Los cómputos se fundan en 50 años de observaciones y el error cuadrático de las previsiones es de $\pm$ 20 %. Las variables utilizadas son el promedio de mayo, junio y julio, de las anomalías relativas de la temperatura del aire en el Pacífico Sudoeste (al sur de Nueva Zelandia) y las de la costa centro-norte de Chile (Pacífico Oriental), y las anomalías relativas de la presión, en los mismos meses, en el Océano Indico Tropical y en el Anticiclón del Pacífico Sur. También se incluyen algunos otros resultados.

SUMMARY

A regression formula has been calculated to foreshadow rain anomalies (in percent of normal precipitation) for October, November and December, in the Argentine crop and cattle region. Computations are based on 50 years observations and standard error of forecasts is $\pm$ 20 %. Data used are relative air temperature anomalies in the South West Pacific (south of New Zealand) and those of the central-northern Chilean coast (East South Pacific), and relative pressure anomalies in the Tropical Indian Ocean and of the South Pacific Anticyclon ; all of them means of May, June and July. Some other results are also given.

1. INTRODUCCION

El presente trabajo tiene como antecedentes los que se indican en (1) y (2) en la bibliografía. En el (1) se expresaba que no había sido posible establecer vinculaciones de causa a efecto, en el propósito de determinar las perspectivas de las lluvias mensuales

(o de mayor lapso) en la región agropecuaria argentina, si bien fue factible encontrar asociaciones estadísticas entre las anomalías de las lluvias mensuales y las fluctuaciones de diversas variables (en su mayoría observaciones de superficie) del hemisferio sur, en los meses precedentes. Aparentemente, los procesos que gobiernan las variaciones de las lluvias tienen "libertad" para actuar según diversos caminos; esta acción se traduce en manifestaciones que no siempre son iguales, manifestaciones cuya vinculación con los fenómenos pluviométricos es indirecta y de carácter estadístico.

En el trabajo (2) (ver bibliografía), se enunciaban las circunstancias asociadas a excesos y defectos de lluvias.

Mediante nuevas investigaciones, mencionadas más abajo, ha sido posible calcular una fórmula de regresión que permite un éxito aceptable en la determinación de las perspectivas de las lluvias, de octubre a diciembre, en la región agropecuaria argentina. Con los datos de 1916 a 1950, se computaron expresiones para las cuatro estaciones del año y para los indicados tres últimos meses, reservando el período 1951-1965 para verificación de las mismas. Salvo para los meses señalados, en los demás los resultados de los años de control fueron pobres.

2. DATOS UTILIZADOS Y FUENTE DE LOS MISMOS

2.1. Los valores de temperatura y presión en superficie, y de lluvias, fueron extraídos del World Weather Records, del Monthly Climatic Data for the World (ambos de EE. UU.) y del Boletín Mensual del Tiempo (Argentina). Por lo general, los desvíos de las variables fueron referidos a normales de diez a veinte años.

2.2. Para las precipitaciones de la región agropecuaria se emplearon las siguientes estaciones:

1916-1945: Buenos Aires, Concordia, Córdoba, Gral. Acha y Gral. Lavalle.

1946-1950: Buenos Aires, Córdoba y Gral. Lavalle.

1951-1965: Buenos Aires, Concordia, Córdoba, Santa Rosa y Mar del Plata.

2.3. Notaciones:

An: anomalía.

An. llv.: anomalía de las lluvias mensuales en la región agropecuaria, en porciento.

An. rel.: anomalía relativa (ver 2.4.).

An. llv. (época) (%): anomalía de las lluvias caídas en una determinada época del año en la región agropecuaria, en porciento (ver 2.5.2.).

An. rel. llv.: anomalía relativa de las lluvias en la región agropecuaria (ver 2.5.1.).

Ant. Pac.: anticiclón del Pacífico Sur.

D: desvío de una variable respecto de la normal.

DA: desvío aritmético medio.

DA llv.: desvío aritmético medio mensual de las lluvias.

DC: desvío cuadrático medio.

DM: desvío mediano.

EC: error cuadrático medio.

Ind. Tr.: océano Indico Tropical.

Pac. Or.: océano Pacífico (sur) oriental.

Pac. SO: océano Pacífico (sur) sudoeste.

PP: presión atmosférica al nivel del mar.

r: coeficiente de correlación simple.

R: coeficiente de correlación múltiple.

R^2: coeficiente de determinación.

TT: temperatura del aire en superficie.

X_0: An. llv. (época) (%).

X_1: An. rel. llv. (época) (promedio de tres meses consecutivos).

X_2: An. rel. TT Pac. SO (promedio de tres meses consecutivos).

X_3: An. rel. TT Pac. Or. (promedio de tres meses consecutivos).

X_4: An. rel. PP Ant. Pac. (promedio de tres meses consecutivos).

X_5: An. rel. PP Ind. Tr. (promedio de tres meses consecutivos).

Nota: Cuando se indica fecha para variables que son promedio de tres meses consecutivos, se señala el mes central.

2.4. Se definió como anomalía relativa mensual al cociente de dividir el desvío registrado en alguna variable por el desvío aritmético medio (An. rel. = D/DA). Las anomalías relativas presentan la ventaja de tornar comparables las magnitudes de los desvíos obtenidos en diferentes puntos geográficos.

2.5. Las anomalías de las precipitaciones fueron computadas según dos métodos:

2.5.1. El primero, utilizado para todas las investigaciones fundamentales, define como anomalía relativa de las lluvias de una determinada época del año al promedio de las anomalías relativas correspondientes a los meses que integran dicha época (X_1). Para cada mes la anomalía de la lluvia (An. llv.) es:

$$\text{An. llv.} = 100 \left(\frac{\Sigma \text{ llv. estaciones}}{\Sigma \text{ normales llv. estaciones}} - 1 \right)$$

La anomalía relativa de la lluvia es (ver 2.4.):

$$\text{An. rel. llv.} = \frac{\text{An. llv.}}{\text{DA llv.}}$$

siendo DA llv.: para los meses de octubre a marzo: 31 %;
para los meses de abril a septiembre: 52 %.

2.5.2. El segundo método, empleado en adición al primero para las precipitaciones de octubre, noviembre y diciembre, determina las An. llv. de estos tres meses en conjunto (X_0):

$$\text{An. llv. oct./dic. } (\%) = 100 \left(\frac{\Sigma \text{ llv. estac. oct. a dic.}}{\Sigma \text{ norm. llv. estac. oct. a dic.}} - 1 \right)$$

2.5.3. Los datos estadísticos de las An. llv. oct./dic. (%) son los siguientes:

—Desvío cuadrático medio (DC): ± 27,7 % (abarca el 68 % de las observaciones);

—Desvío aritmético medio (DA): ± 21,6 % (abarca el 57 % de las observaciones);

—Desvío mediano (DM): ± 18 % (abarca el 50 % de las observaciones).

2.6. Las estaciones, en base a las cuales se calcularon las anomalías relativas de las variables en las distintas regiones geográficas (temperatura del aire en superficie y presión atmosférica al nivel del mar) son éstas:

2.6.1. Temperatura (TT):

2.6.1.1. Pacífico (sur) sudoeste (Pac. SO) (estaciones de Nueva Zelandia):

1916 a 1938: Dunedin;
1939 a 1961: Dunedin e I. Chatham;
1962 a 1965: Invercargill (corregido para obtener Dunedin) e I. Chatham.

2.6.1.2. Pacífico Oriental (Pac. Or.) (estaciones chilenas):

1916 a 1930: Iquique y Punta Tortuga;
1931 a 1950: Arica o Iquique y P. Tortuga o La Serena;
1951 a 1965: Arica y Valparaíso.

2.6.2. Presión (PP):

2.6.2.1. Anticiclón del Pacífico sur (Ant. Pac.):

1916 a 1920: Auckland (N. Zelandia) y P. Tortuga;
1921 a 1930: I. Suva (Fiji), Auckland y P. Tortuga;
1931 a 1965: I. Suva-B. Lauthala, Auckland e I. Juan Fernández (Chile).

2.6.2.2. Indico Tropical (Ind. Tr.):

1916 a 1920: Zanzízar, Colombo (Ceilán) y Batavia;
1921 a 1935: Zanzíbar, Colombo e I. Christmas;
1936 a 1950: Zanzíbar, Colombo y Batavia-Djakarta (Indonesia);
1951 a 1965: Dar es Salaam, Colombo y Djakarta.

2.6.3. Los desvíos aritméticos medios (DA), respecto de la normal de cada mes, son (valores absolutos):

Dunedin (TT): 0,91° C	Arica (TT): 0,85° C
I. Chatham (TT): 0,60° C	P. Tortuga-La Serena (TT): 0,50° C
Iquique (TT): 0,60° C	Valparaíso (TT): 0,55° C
Auckland (PP): 2,67 mb	Suva-B. Lauthala (PP): 0,90 mb
P. Tortuga (PP): 0,64 mb	Juan Fernández (PP): 1,35 mb
Zanzíbar (PP): 0,46 mb	Dar es Salaam (PP): 1,10 mb
Colombo (PP): 0,56 mb	Batavia-Djakarta (PP): 0,68 mb
I. Christmas (PP): 0,90 mb	

Nota: Invergargill (TT): sus registros fueron corregidos para reducirlos a los de Dunedin.

2.6.4. Los desvíos cuadráticos y aritméticos medios de las variables de las diferentes regiones geográficas son (valores absolutos):

	Julio DC	Julio DA	Noviembre DC	Noviembre DA	Enero DC	Enero DA	Abril DC	Abril DA	Año DC	Año DA
X_2 (An. rel. TT Pac. SO (md. 3 ms.)..	0,60	0,48	0,83	0,67	1,05	0,84	0,80	0,64	0,82	0,66
X_3 (An. rel. TT Pac. Or. (md. 3 ms.).	0,98	0,79	0,70	0,56	0,83	0,66	1,02	0,81	0,88	0,70
X_4 (An. rel. PP Ant. Pac. (md. 3 ms.)	0,79	0,64	0,53	0,42	0,50	0,40	0,45	0,36	0,57	0,46
X_5 (An. rel. PP Ind. Tr. (md. 3 ms.).	0,72	0,58	0,77	0,61	1,04	0,83	0,65	0,52	0,80	0,64

2.7. Las anomalías relativas correspondientes a cada región geográfica se calculan haciendo el promedio de las anomalías relativas de las estaciones mencionadas 2.6.1. y 2.6.2.

2.8. Para los cómputos se utilizaron las medias móviles de tres meses consecutivos de las anomalías relativas, correspondientes a cada región geográfica, tomándose como mes de la fecha al mes central.

3. FORMULAS DE REGRESION Y ACOTACIONES

3.1. Fórmulas de regresión.

La investigación comenzó mediante el cálculo de las An. rel. llv. (X_1) para las distintas épocas del año, esto es: octubre a diciembre; diciembre, enero y febrero (verano); marzo, abril y mayo (otoño); junio, julio y agosto (invierno) y septiembre, octubre y noviembre (primavera), recurriendo a los registros de los años 1916 a 1950.

La fórmula de regresión adoptada fue del tipo:

$$X_1 = a(X_2) + b(X_3) + c(X_4) + d(X_5) \pm \mathrm{EC}$$

donde (X_1), (X_2), (X_3), (X_4) y (X_5) tienen el significado que se menciona en 2.3.

El cálculo se realizó para valores de las variables independientes desde seis meses antes y hasta la simultaneidad. El mejor ajuste correspondió a las An. rel. llv. oct/dic. y fechas de las variables independientes de 5 y 4 meses antes. Los coeficientes de determinación (R^2) fueron:

para datos de junio: 0,489
para los de julio: 0,508.

Se destinaron los registros de los años 1951 a 1965 para verificar el funcionamiento de las fórmulas de regresión; los resultados fueron aceptables para las lluvias de octubre, noviembre y diciembre, donde se obtuvieron (ver cuadro 1) los siguientes coeficientes de correlación simple (r) entre los valores previstos y los ocurridos:

con los datos de junio: 0,58 y EC = 19,7 %;
con los datos de julio: 0,54 y EC = 20,7 %.

El cálculo fue rehecho, utilizando ahora las An. llv. oct/dic. (%), es decir (X_0). Los coeficientes de determinación (R^2) son: 0,483 partiendo de la información de junio, y 0,472 en base a los registros de julio. El control practicado con el período de prueba arrojó estos coeficientes de correlación entre lo previsto y lo sucedido:

con los datos de junio: 0,60 y EC = 19,2 % (ver fig. 1);
con los datos de julio: 0,56 y EC = 20,6 %.

El cuadro 1 contiene todo lo dicho y, además, los coeficientes de las fórmulas de regresión computadas para el período de 50 años, 1916 a 1965.

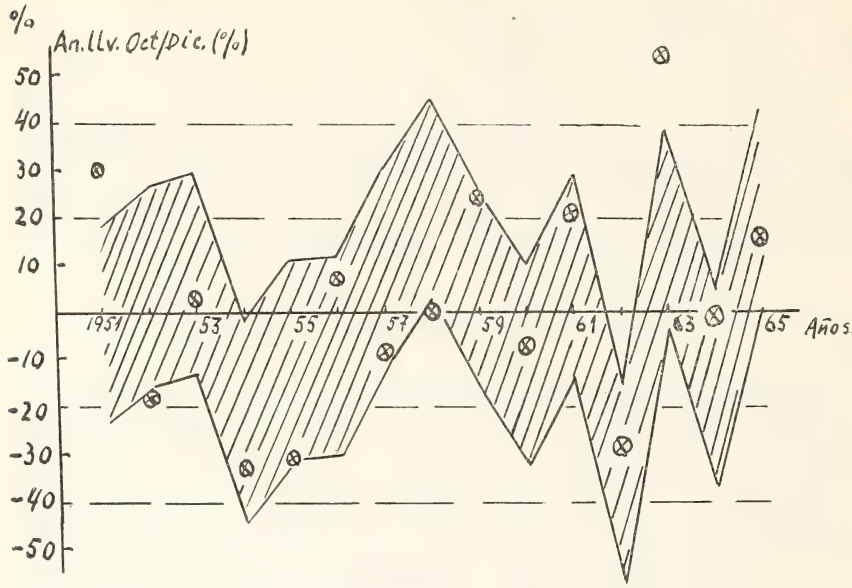
Hemos preferido la fórmula de regresión que expresa las An. llv. oct./dic. (%), no solamente porque el error cuadrático (EC) es ligeramente menor, sino, también, porque da, de manera directa, los porcentajes de exceso o defecto, respecto de la normal, que deben esperarse en las precipitaciones de octubre a diciembre en la región agropecuaria. En otras palabras, adoptamos la siguiente fórmula ($R^2 = 0{,}453$):

An. llv. oct./dic. (%) =

– 12,8 An. rel. TT Pac. SO + 8,0 An. rel. TT Pac. Or. +
– 10,3 An. rel. PP Ant. Pac. + 5,3 An. rel. PP Ind. Tr. +
± 20 %

donde los valores de las variables independientes son el promedio de las An. rel. pertinentes de los meses de mayo, junio y julio.

De esta manera, en los primeros días de agosto podrán obtenerse las perspectivas de las lluvias para los tres últimos meses del año.



Referencias : : previsión de anomalías de las lluvias para octubre, noviembre y diciembre (EC : 21 %).

⊗ : Anomalías de lluvia ocurridas.

Fig. 1. — Verificación de la fórmula de regresión de An. llv. Oct./Dic. (%), calculada en base a datos de mayo, junio y julio del período 1916-1950. Período de prueba : 1951-1965.

La contribución de las diversas variables al (R^2) de la fórmula adoptada es: An. rel. TT Pac. SO: 0,130; An. rel. TT Pac. Or.: 0,158; An. rel. PP Ant. Pac.: 0,122 y An. rel. PP. Ind. Tr.: 0,043.

3.2. Acotaciones.

3.2.1. La vinculación entre las variables independientes y las anomalías de las lluvias parece ser indirecta y consecuencia de ter-

ceros factores. Se trataría de fenómenos asociados a los procesos que, en última instancia, llevan a ocasionar las oscilaciones que se observan en las lluvias de la región considerada.

3.2.2. Como la previsión provee perspectivas medias y se refiere a un área muy extensa, conviene tener en cuenta la posibilidad de variaciones locales, originadas por defectos en la uniformidad de las precipitaciones.

3.2.3. Como los vientos dominantes en el Pacífico sudoeste y Pacífico oriental soplan desde el mar, parece razonable suponer que el estado térmico de las aguas superficiales marinas ejercerá algún efecto sobre las temperaturas del aire, medidas en dichas zonas. En base a ello es dable conjeturar que la circulación y estado térmico de las aguas superficiales son agentes aptos para influenciar los fenómenos que, eventualmente, producirán exceso o escasez de lluvias en la región agropecuaria.

3.2.4. En relación con lo anterior, la correlación (25 años de observaciones: 1916 a 1930 y 1941 a 1950) entre las An. llv. oct/dic. (%) y los promedios de tres meses consecutivos de las anomalías relativas de las temperaturas en Evangelistas (Chile), precedentes, arroja los siguientes coeficientes (r) para con los valores de: mayo, —0,24; julio, —0,28; septiembre, —0,48, y noviembre, —0,62. Ello implica que los octubres, noviembres y diciembres fríos en Evangelistas (presumiblemente con temperaturas del mar más bajas que lo normal) se asocian con lluvias abundantes en la región agropecuaria argentina y viceversa. Acotemos que lo obtenido en (2) (ver bibliografía) podría indicar que la ligazón entre TT Evangelistas y las precipitaciones no es igual para todas las épocas del año.

3.2.5. La correlación (serie de 300 meses: 25 años) entre las An. rel. TT Evangelistas y las An. rel. TT Pac. SO antecedentes (siempre promedios de tres meses seguidos) ofrece dos picos positivos, uno para 6 meses antes (r = 0,29) y el segundo para los meses simultáneo y siguiente (r = 0,36). Como la autocorrelación de las An. rel. TT Evangelistas resulta cero para el mes —6, es posible interpretar que el primer pico positivo en la vinculación con las An. rel. TT Pac. SO, se engendraría a través del transporte de las aguas superficiales por la corriente marina (ello significaría

CUADRO 1

Resultados comparativos

Previsión de las An. llv. oct./dic. (%) (X_0)

Lapso cálculo form. regr.	Coeficiente en X_2 *a*	X_3 *b*	X_4 *c*	X_5 *d*	R	EC val. abs.
Datos de junio [1] :						
1916-50	—14,8	8,6	—8,7	5,5	0,695	20,9 %
Verific. 1951-1965 :					0,598	19,2 »
1916-65	—12,8	8,0	—10,3	5,3	0,673	20,5 »
Datos de julio [2] :						
1916-50	—5,8	12,6	0,8	12,6	0,685	21,2 »
Verific. 1951-1965 :					0,556	20,6 »
1916-65	—7,9	9,5	—4,0	10,8	0,664	20,7 »

Previsión de las An. rel. llv. oct./dic. (X_1)

Lapso cálculo form. regr.	*a*	*b*	*c*	*d*	R	EC
Datos de junio [1] :						
1916-50	—0,43	0,30	—0,29	0,24	0,698	0,697
Verific. 1951-1965 :					0,580	0,636 (19,7 %)
1916-65	—0,38	0,29	—0,33	0,19	0,669	0,686 (21,2 %)
Datos de julio [2] :						
1916-50	—0,15	0,41	0,02	0,50	0,714	0,683
Verific. 1951-1965 :					0,542	0,669 (20,7 %)
1916-65	—0,23	0,33	—0,13	0,37	0,674	0,682 (21,1 %)

[1] Promedios de mayo, junio y julio.

[2] Promedios de junio, julio y agosto.

Nota. — Para reducir las An. rel. llv. y sus (EC) a porcentajes, multiplicar por 31.

una velocidad del orden de 0,8 millas por hora), mientras que el segundo pico sería la consecuencia de fenómenos que abarcan, al mismo tiempo, todo el Pacífico sur.

3.2.6. Por otra parte, como la correlación (1916 a 1950) entre las An. rel. llv. oct/dic. y las An. rel. TT Pac. SO, de 6 y 5 meses antes (mayo y junio) es de —0,36 y —0,43 respectivamente, los resultados de las tres vinculaciones encontradas son congruentes entre sí y sugieren que, al emplear las An. rel. TT Pac. SO de junio para prever las lluvias de octubre-diciembre en la zona agropecuaria, estaríamos tomando en cuenta, de alguna manera, un posible efecto engendrado por el traslado de las aguas marinas.

3.2.7. Las magnitudes del coeficiente de correlación simple (1916-1950) entre las An. rel. llv. oct/dic. y las An. rel. TT Pac. Or. de los meses anteriores, muestran pocas variaciones, conservándose, de junio a noviembre, entre 0,60 y 0,51. En la fórmula de regresión correspondiente a la simultaneidad, la incidencia de las An. rel. TT Pac. Or. en el coeficiente de determinación (R^2) es abrumadoramente grande: 0,252 sobre un $R^2 = 0{,}269$ (período 1916-1960).

3.2.8. En lo que hace a la correlación simple entre las anomalías de las lluvias de octubre a diciembre y las An. rel. PP. Ant. Pac., la asociación es inversa, con r = —0,52 para junio y —0,49 para septiembre, y decreciendo a —0,18 en noviembre.

3.2.9. La ligazón de las An. rel. llv. oct/dic. con las An. rel. PP Ind. Tr. presenta un máximo respecto de las de julio (r = 0,57). Ello inclinaría a especular sobre las posibles circunstancias del verano en el hemisferio norte (junio, julio y agosto) y los fenómenos inducidos por la gran masa continental afro-asiática en la circulación general y en su desarrollo ulterior a través de la alta atmósfera.

3.2.10. El número de estaciones utilizadas para determinar las anomalías de la presión en el Indico Tropical y en el anticiclón del Pacífico sur, es escaso y sería conveniente incrementarlo a fin de mejorar la representatividad de las cifras finales. Nosotros, con el objeto de conservar la uniformidad de las series, hemos mantenido, en lo posible, el número y ubicación de las estaciones de las cuales disponíamos de información en las fechas más antiguas del lapso

cubierto por el estudio. Nada obsta, sin embargo, que para el empleo práctico de la fórmula de regresión propuesta se incorporaran nuevas estaciones, de las cuales se disponga de datos en el presente, acreciendo la densidad de las observaciones en esas áreas. Además, las cifras de la presión deben ser proporcionadas en milibares y décimos.

4. CORRELACIONES SIMÚLTANEAS

En el cuadro 2 se ofrecen las correlaciones simples, entre valores del mismo mes, de las variables independientes (medias de tres meses de las anomalías relativas), pudiendo notarse un marcado efecto estacional en la magnitud de las vinculaciones.

4.1. La conexión entre las An. rel. PP. Ind. Tr. y las An. rel. PP. Ant. Pac. es máxima hacia el final del verano en el hemisferio norte (julio, agosto y septiembre), lo que estaría de acuerdo con lo señalado en 3.2.9.

4.2. El anticiclón del Pacífico sur muestra la correlación que era de esperar con las temperaturas en el Pacífico sudoeste y Pacífico oriental, ya que la intensificación del anticiclón incrementa la frecuencia de vientos del sector norte (más cálidos) en la primera de las regiones, y del sector sur (más frescos) en la segunda. La inversa es cierto. Este control aparece más marcado al final del invierno en el H. Sur, es decir, en agosto y septiembre.

4.3. La vinculación opuesta entre las An. rel. TT Pac. SO y las An. rel. TT Pac. Or. podría atribuirse, al menos en parte, al control del anticiclón, y aquí encontramos también que las correlaciones más grandes son las de agosto y septiembre.

4.4. La correlación positiva entre las oscilaciones de la presión en el Indico Tropical y de la temperatura en el Pacífico Oriental excede la que podría esperarse mediante la vinculación Indico Tropical-anticiclón del Pacífico sur, y llega a ser considerable en el equinoccio de primavera del H. Norte ($r = 0,64$ en abril). Es posible que la explicación de este hecho deba buscarse en la circulación de la atmósfera superior.

4.5. La asociación entre las An. rel. PP. Ind. Tr. y las temperaturas del Pacífico sudoeste no alcanza gran magnitud y, en ge-

neral, es mayor cuando la ligazón entre el Indico Tropical y el anticiclón del Pacífico sur es más estrecha (mayo a septiembre).

CUADRO 2

Correlaciones simultáneas de las An. rel. md. 3 ms., 1916-1950

Valores de (r)

	PP Ind. Tr. con			PP Ant. Pac. con		TT Pac. SO con
	PP Ant. Pac.	TT Pac. SO	TT Pac. Or.	TT Pac. SO	TT Pac. Or.	TT Pac. Or.
Enero	−0,17	0,04	0,48	0,31	−0,21	−0,24
Febrero	−0,15	0,02	0,53	0,24	−0,16	−0,12
Marzo	−0,24	−0,14	0,59	0,24	−0,21	−0,04
Abril	−0,07	−0,30	0,64	0,23	−0,15	−0,19
Mayo	−0,23	−0,31	0,56	0,30	−0,49	−0,26
Junio [1]	−0,23	−0,21	0,40	0,18	−0,52	−0,27
Julio [1]	−0,30	−0,15	0,38	0,40	−0,61	−0,37
Agosto	−0,40	−0,31	0,40	0,63	−0,68	−0,63
Septiembre	−0,36	−0,28	0,39	0,52	−0,81	−0,67
Octubre	−0,22	−0,13	0,17	0,49	−0,36	−0,54
Noviembre [2]	−0,04	0,02	0,22	0,23	−0,25	−0,34
Diciembre	−0,07	0,10	0,30	0,29	0,01	−0,28

[1] 1916-1965. [2] 1916-1960.

5. CORRELACIONES NO SIMULTANEAS

En el cuadro 3 se dan las correlaciones obtenidas partiendo de determinadas fechas de algunas variables independientes, con la evolución de otras en los meses precedentes y siguientes. El periodo cubierto va de 1916 a 1965.

5.1. Al analizar la evolución de las An. rel. PP Ant. Pac., relacionadas con las An. rel. PP Ind. Tr. de julio y de enero se nota una asociación negativa, más pequeña en el primer caso que en el segundo. Es llamativo el coeficiente de cierta importancia (r = −0,46 y −0,47) entre las An. rel. PP. Ind. Tr. de enero y las An. rel. PP Ant. Pac. de julio y agosto antecedentes.

5.2. La conexión entre las An. rel. PP Ind. Tr. de enero y julio y las An. rel. TT Pac. Or. que las anticipan y siguen, es positiva y superior a lo que sería dable esperar de una ligazón a través del anticiclón del Pacífico. Se observan dos picos, con (r) mayor de 0,49, anteriores y posteriores a las fechas de An. rel. PP Ind. Tr., que parecen apuntar a vinculaciones de acción recíproca mediante algún mecanismo de la circulación general. El mismo caso se nota entre las An. rel. PP Ind. Tr. de julio y las An. rel. TT Pac. SO, con r = —0,40 para con las An. rel. TT Pac. SO de octubre.

5.3. Las An. rel. PP. Ant. Pac. de julio y las An. rel. TT Pac. Or. muestran la asociación lógica, advirtiéndose un ligero efecto de "arrastre" sobre las temperaturas del Pac. Or. de los meses siguiente y subsiguiente.

5.4. Cuando se toman como referencia las An. rel. TT Pac. SO de julio, aparecen correlaciones negativas con las An. rel. TT Pac. Or., que si bien admitirían una explicación, por medio de la relación con el anticiclón del Pacífico sur, para los valores próximos a la simultaneidad, no resulta así para con los r = —0,43 y —0,42 de septiembre y octubre. Aquí la causa debe residir en otros factores circulatorios.

5.5. Lo expuesto hasta ahora, lo investigado respecto de las fórmulas de regresión y lo enunciado para las correlaciones simultáneas muestra, una vez más, que la atmósfera constituye un todo muy complejo, con interacciones recíprocas que enmascaran o diluyen los fenómenos "causas" y hace presumir que, frecuentemente, efectos similares pueden ser resultados de procesos distintos.

6. CONCLUSIONES

La búsqueda de asociaciones con el propósito de determinar, con suficiente anticipación, las perspectivas de las lluvias en la región agropecuaria argentina, logró lo que parece ser un éxito aceptable respecto de las precipitaciones de octubre, noviembre y diciembre, mediante una fórmula de regresión que utiliza observaciones de mayo, junio y julio. Dicho de otra manera, la previsión para los tres últimos meses del año puede ser calculada en los primeros días de agosto, a dos meses del comienzo del período para el cual se prevé.

CUADRO 3

Correlaciones de las An. rel. (md. 3 ms.) de determinadas fechas de algunas variables, con las An. rel. (md. 3 ms.) precedentes y siguientes de otras variables. Período 1916 a 1965.

Valores de (r)

Meses antes y después	PP Ind. Tr. (En.) con		PP Ind. Tr. (Jl.) con			PP Ant. Pac. (Jl.) con	TT Pac. SO (Jl.) con	
	PP Ant. Pac.	TT Pac. Or.	PP Ant. Pac.	TT Pac. Or.	TT Pac. SO	TT Pac. Or.	TT Pac. Or.	PP Ant. Pac.
—6 ..	—0,46	0,53	—0,21	0,27	—0,04	—0,03	—0,18	0,14
—5 ..	—0,47	0,57	—0,22	0,32	—0,08	—0,10	—0,19	0,04
—4 ..	—0,38	0,54	—0,24	0,41	—0,18	—0,16	—0,17	0,09
—3 ..	—0,30	0,50	—0,17	0,48	—0,29	—0,21	—0,15	0,11
—2 ..	—0,18	0,46	—0,23	0,49	—0,27	—0,32	—0,16	0,26
—1 ..	—0,13	0,40	—0.23	0,40	—0,17	—0,47	—0,29	0,25
0 ..	—0,12	0,44	—0,30	0,38	—0,15	—0,61	—0,37	0,40
1 ..	—0,09	0,50	—0,29	0,35	—0,24	—0,60	—0,40	0,33
2 ..	—0,05	0,53	—0,25	0,35	—0,35	—0,51	—0,43	0,28
3 ..	—0,07	0,57	—0,21	0,29	—0,40	—0,43	—0,42	—0,05
4 ..	—0,10	0,48	—0,16	0,34	—0,31	—0,37	—0,21	—0,09
5 ..	—0,17	0,38	—0,15	0,45	—0,30	—0,25	0,01	—0,10
6 ..	—0,11	0,27	—0,05	0,52	—0,24	—0,21	0,06	—0,02

El hecho de haber obtenido, en el lapso de 15 años, de 1951 a 1965, reservado para verificación, un coeficiente de correlación simple de 0,60 (EC = ± 19 %) entre lo previsto y lo ocurrido, hace suponer que la correlación es real. Así, también, la circunstancia de que los coeficientes de las variables se mantienen dentro de magnitudes del mismo orden y sin experimentar alteraciones mayores, en las fórmulas de regresión computadas para los lapsos 1916-1950 y 1916-1965, apunta en el mismo sentido en cuanto a la realidad de la correlación.

No conocemos el o los procesos mediante los cuales se ligan las variables empleadas; suponemos que se trata de manifestaciones producidas por terceros agentes no identificados; por ello estimamos que la fórmula de regresión vincula efectos indirectos. No obstante, pensamos que ella puede ser utilizada, a los fines prácticos,

dentro del margen de error determinado ($\pm$ 20 %), zona dentro de la cual caen el 68 % de las observaciones.

En lo referente a los desvíos extremos, que son los de mayor interés para el agricultor, señalemos, por ejemplo, que cuando la fórmula de regresión prevea An. llv. oct/dic. (%) $\geq + 20\ \% \pm 20\ \%$, la probabilidad de acierto, en cuanto al signo, entre lo previsto y lo registrado, será igual o mayor del 84 %. La misma probabilidad se tendrá cuando la An. llv. oct/dic. (%) prevista sea $\leq -20\ \% \pm 20\ \%$.

BIBLIOGRAFIA

1. « Vinculaciones de las anomalías de las lluvias mensuales en la zona agropecuaria argentina », Anales de la Sociedad Científica Argentina, enero a junio de 1957, por el autor.

2. « Interrelaciones entre anomalías mensuales de lluvias, temperatura, presión, gradientes y variaciones », Revista « Meteoros », Servicio Meteorológico Nacional, octubre-diciembre de 1953, por el autor.

Buenos Aires, octubre 7 de 1966

FACTORES ECOLOGICOS QUE DETERMINAN LA TRICHINIASIS SILVESTRE EN EL OESTE DE SAN LUIS Y ESTE DE MENDOZA*

POR LOS DOCTORES JOSE LUIS MINOPRIO, HIPOLITO y DANTIS ABDON

RESUMEN

Se establece la existencia de Trichiniasis silvestre en una región comprendida entre Mendoza y San Luis (Argentina) y se hacen consideraciones sobre los factores ecológicos que pueden determinarla.

Se ha encontrado *Trichinella spiralis* en especies animales exclusivamente silvestres, pudiendo aparecer brotes enzóticos en épocas de largas sequías. Parece difícil que el foco aumente mucho en dispersión, en razón que los factores socio-ecológicos y geofisiográficos son típicos de la zona afectada.

SUMMARY

The existence of wild Trichiniasis has been established in a region between Mendoza and San Luis (Argentina). Different considerations are made on the ecologic agents that may determine it.

Trichinella spiralis was found in wild animals; enzootic break outs may show up in time of long droughts. It is estimated difficult a large spreading of such a focus because of socioecologic and geophysiographic factors tipical of the affected region.

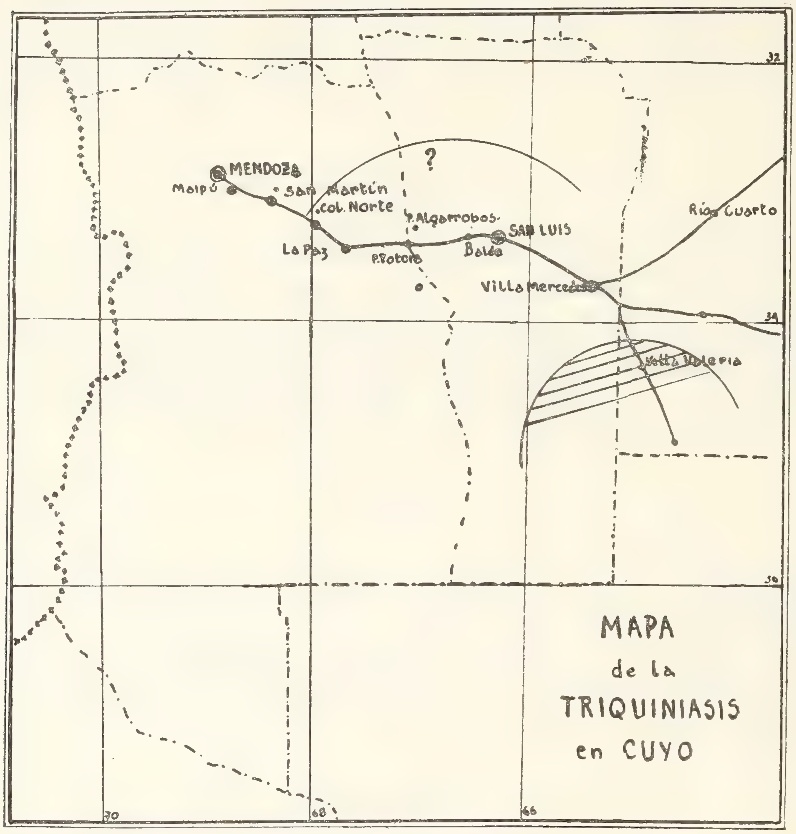
INTRODUCCION

El aspecto silvestre de la Trichiniasis por *Trichinella spiralis* (Owen) consideramos que ha sido poco estudiado (3) y menos aún en nuestra región, por lo que obligatoriamente, en este aspecto, deberemos referirnos a nuestras propias investigaciones.

Aun cuando lo ideal hubiera sido haber podido reunir una cantidad incuestionablemente grande de animales carniceros, desdentados y roedores silvestres procedentes de la región en estudio, he-

* Presentado al Primer Congreso Latinoamericano de Parasitología. Santiago de Chile, 20 de enero de 1967.

mos podido establecer hechos fundamentales que, en nuestro concepto, nos permiten enunciar con mayor seguridad la existencia de Trichiniasis silvestre en una región comprendida entre las localidades de "Balde" (provincia de San Luis) y "Las Catitas" (provincia de Mendoza), de acuerdo con el plano adjunto.



Mapa Nº 1 : Zona de distribución de la Trichiniasis silvestre entre San Luis y Mendoza, que abarca desde San Martín (Mendoza) hasta Balde (San Luis). En subrayado la zona de Villa Valeria (Córdoba) y Sur de San Luis con jabalíes silvestres, peligro potencial de Trichiniasis.

Deseamos dejar constancia de nuestro agradecimiento por la colaboración desinteresada de los profesores Dres. A. Bustos Araujo, J. A. Peiretti, T. Cicarelli y Dres. H. Sanfurgo, M. Fausti, A. Matons, C. García Alonso, R. R. Anzorena, P. Musetescu, H. Lupo, C. Matile, S. Boueri, J. Bauzá y J. Nobiltá, quienes nos han prestado su ayuda, en diversas oportunidades, desde 1958 a 1966, período durante el cual se ha desarrollado esta investigación epizoótica.

ANTECEDENTES

Intermitentemente aparecen focos de Trichiniasis humana en Mendoza, motivado por chacinados de cerdos beneficiados domiciliariamente y así es que nuestra cátedra ha denunciado brotes en 1959, 1963 y 1964 ([7], [8], [9], [10], [11]), estableciendo deductivamente que el origen de la parasitosis porcina estaba en un extenso foco de Trichiniasis silvestre que se estableció, al principio, en Balde (provincia de San Luis), posteriormente se extendió hasta Desaguadero (provincia de Mendoza) y finalmente podemos localizarlo ahora hasta la localidad de "Las Catitas", departamento de Santa Rosa, de esta misma provincia.

Originariamente hemos encontrado grandes dificultades para conseguir la colaboración vernácula, lo que unido a tratarse de una región inhóspita y alejada, de cien a doscientos kilómetros de nuestra cátedra, la presente investigación se ha dificulttado grandemente. Un recurso de orientación muy útil fue conseguir que nos facilitarran gatos viejos, con cuyos diafragmas y lenguas pudimos orientarnos, al principio, partiendo de que en esos referidos ambientes muy difícilmente se les daría restos de chacinados de cerdos a los referidos animales; sin embargo, ello sólo —repetimos— nos sirvió como orientación, pues siendo el gato un animal doméstico, podía infestarse al igual que las personas convivientes, máxime teniendo en cuenta la gran frecuencia de las formas subclínicas o inaparentes de la Trichiniasis humana.

Aun cuando el ideal hubiera sido poder reunir una cantidad incuestionablemente grande de animales carniceros, roedores silvestres y desdentados, hemos podido investigar trichiniasis por el método triquinoscópico en los siguientes animales:

12 gatos: Paso de Los Algarrobos, Balde y Jarilla.
1 perro: Paso de Los Algarrobos.
4 carniceros silvestres: Chosme, Balde y Jarilla.
8 desdentados: puesto Las Totoras y Las Catitas.
8 roedores silvestres: Paso de Los Algarrobos, Chosme y puesto Las Totoras.
34 cerdos: Balde, puesto Las Totoras, San Luis (fuera de estadísticas de Frontini) ; Las Catitas, Paso Los Algarrobos y Santa Rosa.
5 jabalíes: Villa Valeria (prov. Córdoba) y sur de San Luis.

Los que hacen un total de 72 animales, de los cuales se han encontrado parasitados con *Trichinella spiralis* (Owen) 7 de los gatos colectados desde Balde al Paso de los Algarrobos. Un zorro *Pseudolopex gracilis gracilis* (Burm.) en Chosme, de 4 examinados en la zona, un solo desdentado (*Chaetophractus villosus* Desm.), procedente de Las Catitas, animal viejo, que por ese motivo aumenta su "chance" de parasitación. Los desdentados son animales muy interesantes de examinar con esta finalidad, pues se alimentan, principalmente, de animales muertos y tienen una larga vida; un roedor (*Graomis griseoflavus centralis* o var. aff.), diez km al norte de Balde. Debe consignarse que *Graomis* es un interesante género de roedores, con amplia dispersión sudamericana y que la especie *Graomis griseoflavus* está intensamente representada en las regiones estudiadas. Es un roedor de vida nocturna, de posibles hábitos alimentarios semi-omnívoros, que se acerca a las casas-habitaciones, de color grisáceo amarillento, llamado vernáculamente "pericote" por su tamaño, el que es de 17 cm entre cabeza y cuerpo, más 14 cm de cola. Efectúa sus crías en los huecos de los árboles, pero principalmente ocupando nidos de aves, especialmente del llamado "chorlote", donde hay que buscarlo, como se ilustra en la foto 1.

Debe consignarse que es sumamente difícil cazarlo vivo; sin embargo, De la Barrera y Giménez y Cicarelli, según datos personales, han conseguido reproducirlos en cautividad hasta una tercera generación, obteniendo de 4 a 6 gazapos por cría, cifra que coincide con la constatada por nosotros en el medio natural.

Por su dispersión, el número de individuos, su régimen de vida, movilidad y gran reproducción es una especie que puede tener mucha importancia en la posible expansión y mantenimiento de esta enzootia.

De los 34 cerdos cuyas carnes han sido examinadas por nuestra cátedra, se encontraron parasitados con *Trichinella spiralis* (Owen) los 2 de Balde y posiblemente también el del puesto de Las Totoras (no se pudieron individualizar las referidas piezas), pero fueron las que desencadenaron el brote de Trichiniasis humana en San Martín y El Divisadero, en 1958; otros dos cerdos que motivaron el brote de Trichiniasis humana en Colonia Norte de Las Catitas en 1964, y sobre todo dos cerdos más que murieron de Trichiniasis aguda en la finca del doctor Boueri, en Santa Rosa, en

1966, veinte días después de haberse incendiado un campo (con fines de cultivo) cercano a las instalaciones de esos dos cerdos. Hubo un gran desplazamiento de las llamadas "ratas del campo" y a los referidos cerdos se les vio comer alguna. En la carne examinada se encontraron formas larvarias jóvenes y en gran cantidad.



Foto Nº 1 : Retoño de *Prosopis nigra*, con nn nido de ave posteriormente habitado por *Graomis griseoflavus*

Por otra parte, Frontini (2), de 8.111 cerdos examinados triquinoscópicamente en el matadero municipal de la ciudad capital de San Luis, sólo encuentra 114 cerdos parasitados, lo que da una media aproximada de sólo el 0.29 %, de acuerdo al cuadro adjunto:

Cerdos faenados		Casos °/₀
196	2.285	11 (0,48)
1961......................	2.150	7 (0,32)
1962......................	1.627	4 (0,24)
1963......................	2.049	4 (0,10)

Debe consignarse que la provincia de San Luis posee otras regiones muy diferentes a las aquí estudiadas, con explotación ganadera racional, en campos ricos y en donde los índices de Thichiniasis porcina son bajos.

La totalidad de la carne de los cinco jabalíes examinados ha sido negativa, pero debe consignarse que esta especie puede ser motivo de frecuentes casos de infestación humana *.

ECOLOGIA REGIONAL

La zona estudiada, comprendida entre Las Catitas hasta Balde, de acuerdo al plano insertado más adelante, es una vasta región semiárida, de suelo arenoso, donde se practica una ganadería primitiva, a campo abierto, criándose principalmente caprinos, vacunos, equinos, escasos ovinos y familiarmente algunos porcinos, en llamados "puestos", distantes unos de otros de 5 a 10 km y con escasa relación entre ellos.

Se encuentra ubicada entre el meridiano 68° y el paralelo 33° de latitud sur, con una anual de lluvia de 300 mm y una temperatura media anual de 15° C. Con las grandes oscilaciones diurnas y anuales que caracterizan a las regiones mediterráneas y arenosas y en ciertas partes bastante similares a regiones del Asia Menor (5), donde la Trichiniasis se conoce desde los tiempos prebíblicos.

Ubicada a 100 ó 200 km de la ciudad capital de Mendoza, y a unos 100 km de la ciudad capital de San Luis, y a pesar de estar cruzada por la ruta asfaltada a Buenos Aires, la vida es primitiva, sin ningún confort, sintiéndose en el ambiente la fuerte influencia de las reminiscencias sociales de los fondos indígenas regionales (6). Gentes desconfiadas que no colaboran, temiendo por sus intereses, y que han dificultado grandemente nuestra tarea.

La flora (4, 5), base de la vida local, es principalmente xerófila, y a pesar de existir buen número de gramíneas, ella está grandemente influida y empobrecida por los frecuentes y largos períodos de sequías.

* Con motivo del 1er. Congreso Latinoamericano de Parasitología 20-I-67 el doctor Alfredo Ferro narró conocer un foco de Trichiniasis humana partiendo de un jamón de jabalí.

Sus principales géneros y especies son las siguientes:

Familia *Hydnoraceae*

1. *Prosopanche americana* (R. Br.) O. K.
   « flor de tierra » (parásita del alpataco).

Familia *Chenopodiaceae :*

1. *Suaeda divaricata* Moq.
   « jume »

Familia *Amarantaceae* :

1. *Gomphrena tomentosa* (Gris.) R. E. Fries

Familia *Nyctaginaceae* :

1. *Wedeliella incarnata* (1) Cock,

Familia *Capparidaceae :*

1. *Atamisquea emarginata* Miers ex Hook. et Arn.
   « atamisqui »

Familia *Leguminoseae :*

1. *Prosopis alpataco* R. A. Phil.
   « alpataco »

2. *Prosopis nigra*, gris
   « algarrobo negro »
3. *Prosopis alba*, gris
   « algarrobo blanco »
4. *P. strombulifera* (Lam.) Benth.
   « retortuño »

Familia *Ulmacaeae :*

1. *Celtis sellowiana* Miq.
   « tala »

Familia *Zygophyllaceae :*

1. *Bulnesia retama* (Gill. ex Hook.) Gris
   « retamo »

2. *Larrea cuneifolia* Cav.

3. *L. divaricata* Cav.
   «jarillas»

4. *Tribulus terrestris* L.
   « roseta »

5. *Pleetrocarpa tetracantha* Gill. ex Hook.
   « mancapotrillo »

Familia *Malpighiaceae :*

1. *Tricomaria usillo* Gill. ex Hook. et Arn.

Familia *Cacataceae :*

1. *Cereus aethieps* Haw.
2. *Opuntiae aff. Hickenii* Brit. et Rose
3. *O. sulphurea G. Don.*
4. *Echinopsis aff. intricatissima* Speg.

Familia *Verbenaceae :*

1. *Verbena erinacea* Gill. et Hook

Familia *Solanaceae :*

1. *Solanum elaeagnifolium* Cav.
   « quillo »

2. *Lycium* sp.
   « llaullín »

Familia *Compositae :*

1. *Eupatorium* sp,
2. *Verbesina* sp.

y las principales forrajeras naturales siguientes:

Erodium cicutarum L.
Festuca acanthophylla Desv. ; *F. dissiflora* Steud.
Trichloris mendocina (Phil.) F. Kurtz
Aristida adscentionis L. ; *A. mencoina* Phil.
Sporobolus subinclusus Phil.
Setaria mendocina Phil.
Poa lanígena Ness. ; *P. resinulosa* Ness.
Diplahne dubia (Kth) Benth et Hook
Pappophorus Alopecuroideum Vahl. ; *P. Philippianum* Parodi

Stipa gyneroides Phil.
Fragrostis megastachya Koel.
Cynodon dactylon Pers.
Bouteloua curtipendula (Miex) Torrey
Bromus brevis Ness. ; *B. Macranthus* Meyeh ; *B. catharticus* Vahl.

Zoológicamente ([1], [4], [14]) está dentro del llamado distrito zoogeográfico subandino y alberga a los siguientes mamíferos, que pueden estar relacionados con nuestra parasitosis:

Conepatus suffocans mendosus Thos. « chiñe »
Conepatus castaneus proteus Thos. « zorrino »
Chysocyon brachurus (sp. aff.) « aguará-guazú », según datos fidedignos.
Puma concolor puma (Molina) « puma »
Pseudolopex gracilis gracilis (Burm.) « zorro gris »
Pseudolopex culpaeus culpaeus (Mol.) « zorro colorado »
Felix yagouaruondi ameghinoi (Holmberg) « gato eyra »
Microcavia australis joannia (Thos). « cuis chico »
Galea musteloides leucoblephara (Burm.) « cuis oscuro de párpado blanco »
Chelemys macronyx macronyx (Thos). « ratón topo »
Otenomys mendocinus Phil. « tuco-tuco mendocino »
Didephis paraguayensis Oken. « comadreja picaza »
Tatusia hybrida (Desm.) « mulita »
Tolypeutes matacos Desm. « mataco » o « quirquincho bola »
Chaetophractus villosus (Desm.) « peludo »
Chaetophractus vellerosus pannosus (Thos.) « piche llorón »
Zaedyus pichiy (Desm.) Amgh. « piche »

Las llamadas "ratas del cam po" como:

Graomys griseoflavus o sp. aff.
Akodon arenícola (Thom.) Var. *varius* o sp. aff.
Hesperomys laucha (Desm.) Var. *musculinus* o sp. aff.
Reithrodon auritus (Desm.) Var. *auritus* o sp. aff.

Es interesante consignar nuevamente que existen más al Sur, en la provincia de San Luis, hasta la localidad de Villa Valeria en la provincia de Córdoba, jabalíes (*Sus scrofa* L.) europeos, que fueron importados con fines de cacería y que liberados constituyen actualmente, conjuntamente con cerdos Duroc Jersey, asilvestrados y sus híbridos, un serio problema por el efecto depredador de

estos animales en los sembrados y cercas, pero que son cazados en invierno donde su posterior utilización, especialmente como jamones, puede ser peligro de Trichiniasis humana.

El llamado "puestero" de esas zonas arenosas, maneja a su hacienda alrededor de una represa o de un aljibe del que extrae del suelo agua, ligeramente salobre a unos 7-12 metros de profundidad, de manera que los animales no pueden alejarse, en la jornada, más allá de la distancia que les permita volver a la oración para saciar su sed, beneficio éste que no gozan los animales silvestres ([6]).

La ganadería y vida en estos campos serían menos pobres con una distribución anual de lluvias más regular, pero los 200 a 400 mm anuales se distribuyen sólo en dos o tres lluvias de primavera. En la parte de San Luis, el suelo es arenoso pero sin exceso de sales, en Mendoza, en la parte colindante es de terrenos secos y salinos.

En Mendoza, algunos de estos terrenos disponen de regadío artificial y esto permite el florecimiento de cultivos intensivos, los que como en el caso de Santa Rosa, son linderos con campos completamente incultos donde la gente vive pobremente.

Como se ha consignado en ecología, y especialmente en épocas de sequías, los animales hambreados y sedientos comen cualquier cosa y es frecuente entre ellos el canibalismo, motivo por el cual el ciclo de la Trichiniasis puede establecerse estrechamente entre las diversas especies de mamíferos anteriormente consignados.

CONSIDERACIONES FINALES

Es sabido que gatos y ratas se encuentran frecuentemente parasitadas en ambiente donde les es posible alimentarse con desperdicios de carnes de cerdos (Palazzo y col. [12], Rosenbuch y col. [13]), cifras que pueden llegar al 6 % de ellos, pero la frecuencia con que los encontramos parasitados en los años 1959-1960, cifras mucho más altas que las dadas por Frontini ([2]) para los cerdos de la provincia de San Luis y en los pobres ambientes ecológicos donde los gatos se proporcionan el alimento por cacería de roedores silvestres da cierto valor a nuestros hallazgos en gatos; sin embargo, consideramos que el encontrar Trichiniasis sólo en

estos animales, de ninguna manera hubiera sido concluyente para certificar la existencia de Trichiniasis silvestre, a pesar de su valor presuntivo.

De mucho más valor es el haber encontrado *Trichinella spiralis* en especies exclusivamente silvestres *(Pseudolopex gracilis gracilis* (Brum) en Chosme, un *Graomys griseoflavus centralis* o var. aff en Balde (provincia de San Luis) y un *Chaetophractus villosus* (Desm.) en las Catitas, departamento de Santa Rosa (Mendoza), de acuerdo con el mapa ya adjunto, en un número relativamente pequeño, para esta clase de investigaciones, certifican la existencia de Trichiniasis silvestre en las zonas estudiadas, las que, por otra parte, presentan una fisiografía especial que pueden permitir la aparición de brotes enzoóticos especialmente en las épocas de largas sequías que suelen sufrir estas regiones, pero es sobre todo la constatación de dos cerdos que enfermaron de Trichiniasis aguda después del incendio, ex profeso, del campo lindante con fines de cultivo, y en los que se encontraron larvas de *Trichinella spiralis* (Owen) de unos 15 a 20 días de evolución, máxime que otro cerdo recién traído de criadero y bien alimentado, que evidentemente no comió de esos roedores, no enfermó. Los referidos cerdos fueron sacrificados y quemados de manera que no hubo Trichiniasis humana.

Por las razones anteriores consideramos certificada la existencia de Trichiniasis silvestre en la región estudiada, con los graves problemas que ella puede plantear, máxime si ella se extendiera, ya que en esa misma zona la explotación porcina es insignificante, sin carácter verdaderamente comercial y cuyos posibles efectos nocivos para la salud humana podrán limitarse —como se está haciendo— con difusión sanitaria inculcando la noción del peligro de comer carne porcina no suficientemente cocinada y facilitando el control triquinoscópico de los cerdos faenados.

Finalmente consideramos que es difícil, aunque siempre posible, que este foco de Trichiniasis silvestre aumente mucho en su dispersión, pues él está mantenido, a nuestro entender, por factores socio-ecológicos y geofisiográficos típicos de la región afectada.

BIBLIOGRAFIA

1. Cabrera, A., Yepes, J. Mamíferos Sud-Americanos. Ed. Compañía Argentina de Editores. Buenos Aires, 1940.
2. Frontini, C. A. Control de Triquiniasis en la ciudad de San Luis. Bol. de Zoonosis, año II, *21 :* 8, 1964.
3. Gould, S. E. Trichinosis. Ed. Biblioteca de Biología Aplicada, Madrid, 1952, pág. 54, con citas bibliográficas de Alicante (1938), Magath (1939), Geiger y Hobmaier (1939) y Cram (1941).
4. Minoprio, J. L. Sobre el *Chlamyphorus truncatus*, Harlan. Ac. Zool. Lilloana, *3 :* 5, 1945.
5. — Correlación geofisiográfica entre el Turquestán ruso y la región comprendida entre San Juan, Neuquén, Bahía Blanca y Viedma. Bol. Fac. Cienc. Exactas, Físicas y Naturales. Córdoba (Arg.), año IX, *1 :* 189, 1946.
6. Minoprio, J. L., Durandeu, A., Naves, H. y Barcenilla, R. Régimen de vida y problemas sanitarios de los puesteros del Noreste de Mendoza. Com. 2° Cong. Arg. del Trabajo, Mayo 1959.
7. Minoprio, J. L. Brote de Trichiniasis humana en Mendoza. La Semana Médica, julio 4, 11, 1960.
8. — Informe al Ministerio de Asistencia de Mendoza, « Sobre nuevo foco de Trichiniasis en Mendoza », 1964.
9. Minoprio, J. L., Naves, H., Boueri, S., Musetescu, P. y Matile, C. Clínica y consideraciones epidemiológicas de la Triquiniasis en Mendoza. Com. 1ª Reunión de Parasitología de la Rep. Argentina. Tucumán, Oct. 7-10, 1964.
10. Minoprio, J. L., Naves, H. y Musetescu, P. Foco de Trichiniasis selvática en San Luis. Boletín de Zoonosis. Año II, *21 :* 8, 1964.
11. Minoprio, J, L., Fausti, M., Matons, A., Abdon, D., García Alonso, O., Azorena. R. R., Matile, C., Boueri, S. y Peiretti, J. Nuevo brote de Trichiniasis en Cuyo. Com. 8° Congreso Internacional de Medicina, Buenos Aires, 1964.
12. Palazzo, R., Massa, D. y Sodini, C. Triquiniasis humana en la Rep. Argentina. Rev. Sud-americana de Endocrinología, Inmun. y Quimioterapia, 761, 1926.
13. Rosenbuch, F. y Zugózaga, G. A. Frecuencia de la *Trichinella spiralis* (Owen) en la República Argentina y su profilaxis. 1ª Conf. Soc. Sud-americana de Hig. Microb. y Patología, 525, 1917.
14. Yepes, J. Los mamíferos de Mendoza y sus relaciones con las faunas limítrofes. 9ª Reunión Soc. Arg. de Patología Regional, *2 :* 689, 1937.

CENTRALES NUCLEARES

LOS MATERIALES COMBUSTIBLES NUCLEARES

POR EL DR. ING. J-P. ROUX

Comienza con esta, una serie de publicaciones en las que, los ANALES DE LA SOCIEDAD CIENTÍFICA ARGENTINA, *reproducirá algunas de las clases del curso sobre* CENTRALES NUCLEARES, *que auspiciado por el Instituto de Altos Estudios Eléctricos, dictara el Dr. Ing. J-P. Roux, Profesor de la Escuela Superior de Electricidad de París y Director adjunto de Equipamiento de Electricidad de Francia.*

El curso, que fue recibido con gran beneplácito, contó con la asistencia de un calificado grupo de profesionales que siguió con gran interés el desarrollo del mismo.

Las conferencias sobre aplicaciones de los conceptos vertidos, y desarrollo de Centrales Nucleares, así como algunos artículos complementarios del curso, serán publicados por la « Revista Electrotécnica », órgano oficial de la Asociación Argentina de Electrotécnicos.

1. INTRODUCCION

Entenderemos de manera precisa, por *combustible nuclear*, toda sustancia que contenga nucleidos *fisionables* que, colocados dentro de un reactor, permitan desarrollar una *reacción nuclear en cadena*.

Por definición, una sustancia se dice fisionable, si puede sufrir una fisión nuclear por absorción de un neutrón.

Los únicos nucleidos fisionables utilizados actualmente en los reactores son los nucleidos: *U 235, U 233, Pu 239* [1] y sus mezclas, en los cuales la característica fundamental común es la de poder sufrir *la fisión con neutrones de cualquier energía* y con secciones eficaces importantes.

Al lado de estas sustancias fisionables se colocan las sustancias *fértiles*, en las cuales la característica común es, por definición, la de dar origen, después de *una reacción de captura neutrónica*, a una sustancia fisionable.

[1] Pu 241 con Pu 239 son los únicos isótopos fisionables de plutonio.

Los principales materiales fértiles aquí considerados son: *el uranio natural* [2], mezcla de U 238, U 234 [3], U 235 y *el torio* existente naturalmente en Th 232.

Hemos reproducido, en anexos, el desarrollo de cuatro familias radioactivas así como algunas reacciones nucleares que, con ayuda de una tabla periódica, nos permitirán situar los elementos y recordar la generación de nucleidos antes enunciada (ver anexos 1B y 1C).

Teóricamente podría existir U 233 en estado natural, debido a que el Neptunio, descubierto durante los estudios de fisión en 1940, ha sido luego descubierto, en trazas, en la pechblenda del Congo Belga; en realidad, no se lo encuentra en ese estado.

El Plutonio, igualmente descubierto en 1940, se encuentra en trazas ínfimas en estado natural.

Es importante recalcar que, finalmente, las dos sustancias fisionables U 233 y Pu 239 podrían ser consideradas como *productos únicamente artificiales, es decir, de síntesis.*

Podemos atribuir al U 235 el doble carácter de natural y artificial, este último calificativo se aplica en el caso en el cual este isótopo se encuentra, con respecto al U 238, en una proporción superior a aquella del estado natural.

El acrecentamiento de este contenido se obtiene a partir de un conjunto de operaciones muy importante: *la separación de Isótopos,* la cual será tratada en un capítulo próximo.

A todo fin útil hemos transcripto, en el anexo 1 D, algunas definiciones relativas al contenido isotópico y la noción de enriquecimiento.

Las observaciones precedentes llevan a la conclusión de que la mayoría de los materiales combustibles nucleares serán artificiales [4]. El uranio natural en sí, utilizado en forma de barras, es en lo sucesivo, sistemáticamente aleado a una cantidad de molibdeno

[2] Se ha sabido preparar, fuera de los isótopos U 234 y U 235, una docena de isótopos sintéticos, de medidas comprendidas entre 227 y 240.

[3] Este isótopo no será tomado en cuenta debido al hecho de su débil concentración y de su función energética despreciable.

[4] En el anexo 1 E damos un ejemplo de las distintas etapas posibles de un combustible nuclear natural (caso del uranio solamente) o artificial.

capaz de alcanzar algunos porcentajes (las aleaciones de E.D.F. 1-2-3-4 tienen respectivamente 0,5; 1; 1; 1 % Mo).

A partir de las materias "primas" tales como los materiales fértiles o fisionables, los elementos de aleación o de soporte, los combustibles nucleares se pueden, por ejemplo, presentar así:

—*metales no aleados* —*óxidos* —*elementos dispersos en una matriz*
—*metales débilmente aleados* —*carburos*
—*metales fuertemente aleados* —*combustibles con grafito*

con diversos enriquecimientos posibles en uno cualquiera de los materiales fisionables.

Las formas de elaboración son relativamente distintas; se encuentran, por ejemplo, los siguientes productos terminados:

—*chapas* —*hilos* —*tubos* —*soluciones líquidas* [1]
—*barras* —*placas* —*pastillas fritas*

productos a los cuales conviene aplicar, cuando aquella se impone, la operación de envainado [2].

Cualquiera que sean la naturaleza y la forma de los distintos combustibles nucleares, éstos deben en general presentar un cierto grado de *pureza nuclear* [3].

Finalmente, para evitar la contaminación de las superficies, hay que *conservar* los elementos terminados (a la espera del envainado, por ejemplo) según procedimientos perfectamente bien definidos que permiten protegerlos contra los agentes exteriores, en particular, los oxidantes.

Los combustibles nucleares tienen otros problemas además de aquel de la pureza nuclear; citaremos algunos:

[1] Los combustibles líquidos serán tratados por completo en el último párrafo.

[2] *Envainado:* operación que permite revestir un elemento combustible nuclear en su vaina, capa exterior de material aplicada en general sobre un combustible nuclear a fin de asegurar su protección contra un medio ambiente químicamente reactivo, para retener los productos radioactivos elaborados durante la irradiación del compuesto o con el objeto de suministrar un elemento de estructura; las diferentes funciones pueden ser cumplidas simultáneamente.

[3] Ver 2.4.1 (ahora se trata más bien de calidad nuclear).

a) *"Criticidad"*: en los procesos donde son transportadas soluciones de materia fisionable es importante que los recipientes utilizados sean *nuclearmente seguros*; es decir, que estos recipientes que contienen las soluciones deben tener dimensiones tales que el estado crítico no se pueda presentar, cualquiera sean las condiciones de concentración de la masa total.

b) *Comportamiento en fases fuera de combustión*: si es de interés especial el comportamiento de los combustibles antes de la combustión, es importante el correspondiente a las operaciones de elaboración. En efecto, éstas están definidas en función de propiedades reconocidas de los elementos considerados.

En el caso más frecuente de combustibles sólidos, se toman en cuenta los delicados capítulos de la *Física de los Sólidos* para intentar explicar o prever fenómenos tales como: alotropía, anistropía de dilatación, estructura, efectos de la temperatura y de sus variaciones..., factores cuya intensidad es susceptible de imponer, según el caso, *tratamientos técnicos* previos bien definidos.

c) *Comportamiento en fase de combustión*: aquí se trata particularmente del *desgaste* y de la *duración de vida* del combustible, factores económicos muy importantes. Los efectos de la fisión y de fenómenos conexos que ella engendra, los de la temperatura y su variación en el tiempo y en el espacio son objeto de profundos estudios técnicos y de laboratorio. Allí igualmente el dominio de la Física del Sólido es susceptible de ocupar un lugar importante.

d) *Toxicidad*: Se entiende de manera general por toxicidad lo que califica los efectos nefastos sobre el organismo humano de los productos químicos [1] utilizados durante ciertos procesos de elaboración de combustibles nucleares, de sus soluciones y en fin, de los efectos de las radiaciones. En consecuencia, *la protección contra todos estos efectos necesita* instalaciones apropiadas. Este será el caso de las fábricas de extracción del plutonio y de los talleres de tratamiento de las materias irradiadas de las fábricas de separación de isótopos.

[1] Caso del fluor y de ciertos floruros, por ejemplo.

En total, los problemas relativos a los combustibles nucleares son numerosos y delicados en su mayoría.

Por lo tanto, no será posible aquí tener en cuenta sino lo esencial: algunas cuestiones como *la unión eventual entre vaina y elemento combustible* o bien *el mecanismo de la producción de calor y las magnitudes correspondientes* [2] serán tratadas en las lecciones reservadas, por una parte, a los materiales de envainado y por otra, a los diferentes tipos de reactores. Nos extenderemos más sobre el uranio natural que se considera un combustible tipo.

Veremos en el curso de los análisis del uranio que se presentan problemas muy importantes relacionados con la anisotropía del metal puro y con el hecho que en el dominio de las temperaturas inferiores a 668° C no puede existir, para U puro, más que la variedad alotrópica estable correspondiente.

Uno de los fines de los Servicios de Materiales ha consistido especialmente en estudiar las posibles mejoras por adiciones de elementos metálicos en particular.

Existen notables diferencias con los combustibles refractarios a los cuales serán dedicados algunos párrafos, debido a su importancia actual y futura.

2. EL URANIO NATURAL

Consideraciones preliminares

a) No se tendrán en cuenta las diferencias isotópicas entre U 235 y U 238, excepto, se sobreentiende, en lo que concierne a las reacciones nucleares.

b) El uranio natural estudiado aquí será considerado ya sea con o sin producto de adición, asimismo esté o no en aleación con elementos metálicos, lo cual será explicado según el caso.

c) El anexo 2 A señala en forma esquemática las principales operaciones generalmente encontradas entre la prospección de un yacimiento y la obtención del metal uranio y la puesta en condiciones del combustible a utilizar.

[2] Sin embargo, siendo frecuentemente utilizada la cantidad MWd/t, indicamos en el anexo 1 F algunas observaciones y elementos al respecto.

2.1. Generalidades.

El uranio natural, elaborado por primera vez en 1841, aproximadamente cincuenta años después del descubrimiento del óxido negro UO_2, tuvo su desarrollo recién durante el período 1940-45. Anteriormente a este lapso, pocas informaciones se expandieron sobre la explotación de este metal, cuyas propiedades nucleares fundamentales habían sido reconocidas en 1939.

De cualquier manera, una cantidad de yacimientos eran conocidos. La demanda de este material, la búsqueda de éstos, rápidamente se hizo sistemática, movilizando a numerosos servicios de Estado y asimismo algunas empresas privadas alentadas por éstos.

El desarrollo correlativo de la explotación tomó tanto incremento que la ley de oferta y demanda sufrió un vuelvo acentuado aproximadamente en 1957.

En efecto, el grupo U.S.A.-Gran Bretaña-Canadá ha obtenido resultados de explotación superiores a las estimaciones, mediante la concreción de esfuerzos de prospección y de producción.

Desde 1945 hasta 1947, mientras la demanda exterior a este grupo era importante, la oferta de uranio natural era prácticamente nula, es decir, que el mercado libre de uranio no existía.

Esto orientó a ciertos países a buscar el uranio en su propio territorio, lo que ha sido particularmente el caso de Francia.

Poco después de 1957, si bien el mercado libre tenía tendencia a organizarse, la demanda exterior al grupo citado resultaba muy débil, mientras que la oferta era considerable.

Resultó así que debido al desarrollo de la explotación de yacimientos y de la producción realizados por algunos países, prefirieron éstos proseguir sus propios medios, no obstante llegar a un precio superior del uranio propio con respecto al de oferta exterior.

Esto se basa en el hecho de que detener instalaciones no suprime los gastos fijos correspondientes.

Dicho en otra forma, la sobreproducción no encauzó el mercado libre, resultando entonces que las previsiones para el futuro sobre la evolución de la producción deben esperar algún tiempo.

Conviene hacer notar que las reservas mundiales no están en juego, salvo que conviene no desperdiciar el potencial energético puesto a nuestra disposición, lo cual depende del estudio de las diferentes maneras de empleo basadas sobre el uranio natural y sus subproductos después de irradiación.

Con el propósito de fijar ideas, presentamos en el anexo 2.1.A un cuadro de fuentes naturales mundiales de metal actualmente conocidas, así como el tonelaje de uranio metal explotado.

No examinaremos aquí el aspecto del agotamiento de las fuentes: este punto delicado será abordado posteriormente [1].

2.2. Propiedades químicas del uranio natural

2.2.1. *El uranio y los uránidos*

El uranio es, como se sabe, el primer elemento de la serie de los URÁNIDOS: U 92, Np 93, Pu 94, Am 95 [2], distinta de la serie de los CÚRIDOS: Cm 96, Bk 97, Cf 98, E 99, Fm 100, Mv 101 [2] a la vez que la estructura electrónica y las propiedades químicas.

No haremos comparaciones entre estas dos series, salvo las siguientes:

—Los cúridos son todos trivalentes, excepto el berkelio, susceptible de tomar la valencia IV, mientras los *uránidos* están caracterizados por una *fuerte multiplicidad de valencias.* Esta se extiende, en solución acuosa, de III a VI.

La experiencia ha demostrado que para un mismo estado de valencia los uránidos tienen propiedades similares.

Pero, *a raíz de la variabilidad del grado de estabilidad* [3] *de los diversos estados de oxidación de los uránidos y de la diferencia de los potenciales de óxido-reducción, la separación de éstos es relativamente fácil.* Es suficiente, entonces, tratar su mezcla con un oxidante o un reductor, que actúa con uno o dos componentes, no así con los otros. Esto se aplica particularmente a la *separación de U y Pu* existentes en las barras de un reactor heterogéneo.

El estado hexavalente de los uránidos está caracterizado por la formación de acetatos dobles, isomorfos e insolubles en el agua, y también por la solubilidad de los nitratos en el éter.

[1] Ver, sin embargo, nota 4 del anexo 2.1.A.

[2] Respectivamente los símbolos de: uranio, neptunio, plutonio, americio, curio, berkelio, californio y einsteinio, fermio, mendelera última serie, a la cual serían agregados elementos conocidos con número atómico 102 a 103.

[3] Anexo 2.2.A.

2.2.2. *El uranio*

Del punto de vista químico, el uranio es un metal fundamentalmente caracterizado:

—*Muy electropositivo* y *muy reactivo* (prácticamente con todos los elementos, excepto los gases raros); sus dos valencias características son: IV y VI. Esta última es la más estable, constatación análoga a la de las valencias VI del Tungsteno y el Molibdeno, que son los homólogos más próximos al uranio en la clasificación periódica de los elementos.

a) *con el fluor*, el U forma, en particular, *el hexafluoruro* UF_6, análogo a WF_6 y MOF_6, siendo los tres componentes *volátiles* y con espectros infrarrojos de estructuras muy cercanas.

En química nuclear, *el* UF_6 *juega un papel extremadamente importante en la separación isotópica del U 235;* con el fluor, el U forma también los compuestos UF_3, UF_4 (la sal verde) y UF_5.

Los fluoruros presentan el interés particular de servir *como intermediarios en la preparación del uranio metal.*

b) *con el oxígeno*, el U forma los óxidos UO_2 (oscuro), UO_3 (naranja) y el ferróxido UO_4 (amarillo vivo), estables. Este último es *muy insoluble*, lo que significa un buen medio para purificar el uranio.

UO_2 y UO_3 tienden, por calentamiento en el aire, hacia los 800° C, a transformarse en óxido U_3O_8, que sería entonces el más estable [1].

c) *con el hidrógeno:* el hidruro UH_3 se forma fácilmente y es muy inflamable.

Introducido en el agua, el U puede recubrirse de hidruro y encenderse ulteriormente en contacto con el aire.

Notemos que los hidruros tienen densidades más débiles que las del uranio, lo que puede ocasionar la fisuración del metal.

[1] Es por esta razón que los *anglo-sajones* cuentan generalmente el *peso del uranio* contenido en un mineral o en una sal de uranio (U_3O_8), mientras que en Francia la norma es contar directamente en U. Para un mismo producto, las cifras francesas son obtenidas disminuyendo en 15 % las cifras anglosajonas.

d) con el carbono: el uranio da con C el monocarburo UC, el dicarburo UC_2, el sesquicarburo U_2C_3, susceptibles de utilizarse como combustibles nucleares *refractarios.*

A este respecto hacemos notar que el uranio puede ser empleado bajo forma de silisuro, nitruro, sulfuro, boruro (con 11 B, de sección de captura muy débil), y eventualmente bajo forma de compuesto intermetálico con el berilio.

e) con el aire: de color gris, bastante comparable a la plata cuando se pule su superficie, el uranio expuesto al aire se recubre rápidamente de una capa de óxido que le da un aspecto mate.

En copos o en polvo, el uranio puede inflamarse fácilmente y hasta espontáneamente en el último caso.

f) con el nitrógeno: el U forma con el N los nitruros UN, U_2N_3, UN_2. El nitrógeno reacciona sobre U masivo desde los 450° C.

g) en medio acuoso, bases y sales; complejos: el trióxido UO_3 da, en combinación con las bases fuertes, *uranatos muy insolubles.*

Las sales de uranilo son frecuentemente solubles o muy solubles, UO_2SO_4 - $UO_2(NO_3)_2$.

En medio acuoso no se encuentra el uranio sino a la valencia IV (sales derivadas del uranio, la mayor parte insolubles), o a la valencia VI (sales de uranilo).

El radical UO_2^{++} se transforma en complejo fácilmente, lo que en ciertos casos presenta un gran interés práctico para los métodos de los intercambios de iones; también $UO_2(CO_3)_3^{4-}$, complejo amiónico, se forma fácilmente y da, en consecuencia, el uranio a la valencia VI soluble en el carbonato de sodio.

Señalemos una importante propiedad en química nuclear: *la solubilidad del nitrato de uranilo* en numerosos *solventes orgánicos oxigenados.*

h) con el agua: el U reacciona con el agua a la temperatura ordinaria, si está finamente dividido, y a 100° C aproximadamente si se encuentra en masa compacta.

i) con CO_2: el U es susceptible de order en el anhidrido carbónico.

2.3. Desde el mineral al producto concentrado

2.3.1. *Generalidades*

La prospección de los yacimientos de uranio, sobre la cual no nos ocuparemos extensamente, utiliza, como para la prospección de los yacimientos de materiales, todas las propiedades *intrínsecas:* físicas químicas de las especies mineralógicas que constituyen el mineral, a las cuales es necesario agregar la *radioactividad;* las propiedades *extrínsecas:* datos geológicos, petrográficos y metalogénicos.

Se citan más de cincuenta minerales, de los cualees el más célebre, y también el más importante, es la uraninita-pechblenda (bajo forma de óxidos).

Una de las principales diferenciaciones entre las especies uraníferas se establece sobre el grado de valencia del uranio constitutivo: *tetravalencia*, especies generalmente negras, siempre oscuras; *hexavalencias*, especies siempre coloreadas, consideradas como secundarias.

Entre estas dos especies se sitúa una especie intermediaria (las gumitas).

En el conjunto el tenor medio de uranio está escalonado entre 20 % y 85 % con respecto a las especies minerales (fosfatos, hidratos, uraninita, por ejemplo); entre 0,2 ‰ y 1 ‰ con respecto a los minerales.

La experiencia muestra que es interesante escindir en dos la industria de extracción del uranio.

—La industria de concentración del mineral.
—La industria de refinamiento del concentrado.

La primera se impone en particular cuando los gastos de transporte son muy elevados, éste resultando de la fuerte proporción de productos estériles; en este caso se ubica en la proximidad de los yacimientos.

La segunda se ve bajo un aspecto diferente, en base a la baja relación entre el precio del transporte con respecto al precio de fabricación del refinamiento.

Las fábricas, de tamaño netamente inferior al de las instalaciones mineras, están en general alejadas de éstas y más próximas a los lugares de utilización.

Características principales de los dos tipos de industria:

Concentración: Industria de tonelaje (1.000 a 3.000 t de mineral/día, demandando grandes inversiones, mano de obra no muy numerosa y poco especializada, exigiendo material robusto, de poco mantenimiento.

Refinamiento: Requiere igualmente fuertes inversiones, *consumo* de reactivos muy costosos, cuyos precios intervienen principalmente en el costo del refinamiento. Es una industria con acentuado predominio de costos variables.

Resulta de estos criterios de conducción diferentes, que son teóricamente:

a) Las fábricas de concentración deben desarrollarse alrededor del máximo de su capacidad;

b) las refinerías no deben producir sino a medida que se necesite el metal.

Resulta económicamente más ventajoso y más prudente *almacenar* los excedentes temporarios bajo forma de *concentrados*, que en forma de lingotes.

N. B.: La industria de refinamiento y la elaboración de metal serán objeto del parágrafo 2.4.

2.3.2. *Concentración del mineral por vía física:*

El mineral es frecuentemente preconcentrado en la mina a 0,8-3 kg U/tonelada, mediante técnicas clásicas: *separación gravimétrica, flotación, separación electrónica.*

El enriquecimiento es fácil, pero el gasto no es muy elevado. No obstante su importancia, esta vía física ocupa poco lugar con relación a la vía química.

2.3.3. *Concentración del mineral por vía química*

A partir de un mineral preconcentrado o no, triturado, la concentración química tiene por finalidad librar un producto concentrado comercial destinado luego al tratamiento en la fábrica de refinamiento.

Este producto comercial, llamado uranato, puede ser considerado prácticamente como una mezcla de óxido de uranio, con una

cantidad más o menos grande de óxido alcalino o alcalino-térreo y de impurezas.

El uranato comercial contiene, término medio, de *50 a 75 % de uranio natural*.

El anexo 2.3.A. reproduce, en particular, diversas vías posibles del tratamiento de minerales de uranio que permiten obtener un uranato.

a) ATAQUE:

a_1) *Lixiviación alcalina.* Este método, basado en el hecho de que el uranio, a la valencia VI, forma un complejo muy soluble en las soluciones carbonatadas, neutras o ácidas, necesita un medio oxidante para realizar la transformación de U tetravalente en U hexavalente [1].

Resulta muy interesante, pero de aplicación restringida, pues no disuelve sino los óxidos a la valencia VI.

Cuando se tiene éxito, la lixiviación alcalina es la única económica para tratar los minerales calcáreos que consumirían cantidades prohibitivas de ácidos.

La solución uranífera obtenida es del orden de algunos gramos por litro.

a_2) *Lixiviación ácida.* Es el método generalmente empleado. De los tres ácidos corrientes utilizables: clorhídrico, nítrico y sulfúrico, es este último el preferible, dado su bajo precio de costo. El ataque por ácido nítrico es costoso; es un tratamiento de minerales ricos.

La presencia de oxidante es igualmente necesaria (con mayor razón si el mineral contiene reductores sulfurados), debido a la poca solubilidad de las sales de uranio (tetravalentes).

En el caso que se presenten fosfatos, debe agregarse hierro al que naturalmente contiene el mineral. El tenor de uranio en la solución uranífera puede oscilar alrededor de algunos gramos/litro.

b) EXTRACCIÓN:

La extracción es la operación que tiene por finalidad recuperar el uranio de las soluciones provenientes de los ataques ácidos o alcalinos.

[1] Pues esta oxidación condiciona el porcentaje de recuperación.

Es importante hacer notar que estas soluciones son a menudo poco concentradas y contienen todavía muchas impurezas (partículas finas en suspensión).

Por esta razón no se puede, partiendo de estas soluciones, obtener el uranio bajo forma de uranato.

La separación de las impurezas requiere aplicar procesos físico-químicos a las soluciones resultantes de las lexiviaciones una vez que la decantación o la filtración han sido realizadas.

Estos procesos se hacen:

—por *precipitación química*
—por *resinas intercambiadoras de iones.*
—por *solventes*

Los dos últimos procesos reclaman en sí una precipitación química.

b_1) *Precipitación química.* Se ha utilizado frecuentemente la precipitación de un fosfato uranoso, separado luego por filtración sobre filtro prensa.

El producto sólido obtenido contiene de 20 a 40 % de uranio-metal que, todavía, insuficientemente puro, debe ser luego tratado teniendo en cuenta su metalurgia.

Hay interés ahora, por lo menos en Francia, en un precipitado intermediario de uranato de cal, que conduce a una solución de nitrato de uranilo purificado con tributilo-fosfato (TBP) y luego concentrado. Tiene por ventaja reducir el número de operaciones previas a la elaboración.

b_2) *Resinas intercambiadoras de iones.* Este procedimiento realiza, en realidad, una concentración, pues los volúmenes finales de las soluciones son más pequeños que los volúmenes iniciales.

Las resinas utilizadas son casi siempre intercambiadoras de iones con base fuerte y cuyo radical activo es un amonio cuaternario (sobre soporte plástico).

Los granos son de forma esférica: 0,2 a 1,2 mm; la pérdida de carga es del orden de 0,2 kg/cm^2 por metro lineal de resina atravesada.

Dos casos deben considerarse, según que el líquido de ataque sea ácido (generalmente sulfúrico) o básico (carbonato de bicarbonato). No se tratará aquí sino el primer caso; el segundo está menos experimentado.

Solución sulfúrica. Otros metales, además del uranio, por ejemplo Mo, Cr o iones (fosfatos) pueden igualmente fijarse sobre las resinas, pero generalmente sin mucho perjuicio a la capacidad de intercambio de la resina.

Entre los factores que actúan sobre la velocidad de fijación del uranio citemos por ejemplo: el pH, la concentración de uranio, el tiempo de contacto, el grosor de los granos, la temperatura.

Cuando la resina está saturada, *el tratamiento de elución* permite la recuperación del uranio; uno de los mejores eluyentes parece ser una solución de nitrato de amonio acidulado con ácido nítrico. La concentración del *eluyente* puede llegar de 10 a 15 g/litro.

El método de permutación de las columnas es clásicamente aplicado.

La duración útil de la resina es un factor importante a considerar.

b_3) *Solventes.* La técnica de recuperación del uranio por solventes ha sido recientemente introducida en el dominio industrial.

Su empleo es de una gran sencillez, ya que los líquidos son más fáciles de manipular. Es por esta razón que induce a su empleo en lugar de las resinas.

Se prefieren igualmente en lugar de estas últimas para las soluciones de fuerte tenor (varios gramos por litro).

No obstante, pierden su ventaja económica para los tenores bajos, debido a las pérdidas que se producen por solubilidad en los efluentes.

Los solventes más empleados son los ésteres fosfóricos, aminas secundarias o terciarias a larga cadena.

Extracción por los ésteres fosfóricos. Señalemos que el tributilfosfato es muy utilizado para la extracción en medio nítrico.

Este solvente y los otros ésteres son utilizados diluidos en el kerosene. *Serían susceptibles de tratar*, ya no un líquido, sino *una pulpa.*

La reextracción del uranio está asegurada por un tratamiento con carbonato de sodio o de amonio.

Extracción mediante las aminas a larga cadena. Estas aminas permiten extraer el uranio hexavalente de las soluciones sulfúricas. Se utilizan éstas también diluidas. El porcentaje de concentración puede ser muy elevado: a partir de soluciones teniendo 10 a 100 mg/l de uranio, se pueden obtener concentrados de 4 g/l.

La reextracción del uranio puede hacerse con el carbonato de soda y también con soluciones de sal marina, de nitrato de sodio.

Las aminas no permitirían tratar directamente una pulpa.

Los uranatos obtenidos por las diferentes vías serán luego puestos en manos de los encargados de la metalurgia.

Observaciones sobre la radioactividad: Tiene importancia, en el transcurso de los diferentes tratamientos, tomar algunas precauciones respecto a las radiaciones.

Los rayos β o γ pueden tener una intensidad bastante débil para el mineral debido a la autoabsorción. Los β no aparecen prácticamente en los tratamientos químicos, siendo preciso preocuparse de esta radiación en metalurgia.

Conviene evitar al máximo los polvos en los casos en que haya reales riesgos de inhalación de los α.

Hay que tomar precauciones para con el radón (ventilación) desprendido durante la trituración o la lixiviación.

Del hecho que por esta última sólo el U es prácticamente disuelto, no hay que preocuparse de la radiación γ.

Los estériles que contienen radio deben ser vigilados durante sus transferencias y almacenamientos (evitar contaminación de los cursos de agua).

Las fábricas químicas tienen su estación de tratamiento de efluentes, lo que no es despreciable como carga financiera.

Sin embargo, esto puede ser reducido en el caso en que la neutralización de afluentes intervenga como una fase del proceso (fábrica de FOREZ).

2.4. Refinación del concentrado. Elaboración del metal

2.4.1. *Generalidades*

Es importante, en primer lugar, distinguir los diferentes grados de pureza nuclear del metal uranio obtenido por diversas vías. *La pureza nuclear* [1] significa:

1) que los elementos con sección de captura muy elevada deben ser prácticamente eliminados, como el *boro*, el *cadmio* y el *gadolio*.
2) Que los elementos con sección de captura bastante elevada deben estar en proporción suficientemente débil; ejemplo: el magnesio. Para 1) y 2) la sección total de captura de todas las impurezas debe ser inferior a un límite fijado por el físico que está a cargo del proyecto de reactor.
3) Que los elementos con sección de captura bastante débil (el hierro, por ejemplo) o con sección de captura muy débil (el carbono, por ejemplo), pueden estar presentes en mayor cantidad (por ejemplo 100 p.p.m.) sin que por eso haya peligro de perjudicar la fabricación de ciertas aleaciones.
4) Que es necesario evitar la presencia, o al menos reducir el contenido de ciertos elementos, si su presencia no ha sido prevista en la fábrica destinada a volver a tratar el uranio después de la irradiación, en los casos que puedan ser químicamente molestos (caso del silicio o del circonio).

Se distinguirá de una manera general:

—el uranio de pureza suficiente, llamado de pureza nuclear, más o menos contaminado de ciertas impurezas residuales, como, por ejemplo: Al, Cr, Cu, Fe, Si, O_2; es el "*uranio industrial*" reservado a los reactoares y que son objeto del presente parágrafo;

—el uranio llamado de muy alta pureza nuclear, para el cual se ha buscado eliminar las impurezas precitadas, debe ser utilizado en ciertas investigaciones metalúrgicas fundamentales.

1 Se habla sobre todo de calidad nuclear cuando la severidad es adulzada.

Los métodos de elaboración del metal son, en este caso, muy particulares. El más aplicado es el procedimiento electrolítico, que se utiliza partiendo del metal con impurezas.

Dada la importancia de estas investigaciones, daremos algunas indicaciones sobre este último procedimiento.

Primero trataremos los métodos de elaboración más corrientes, así como la preparación de polvos metálicos de uranio [1] en relación con los procesos de compresión del polvo y con la preparación de productos refractarios, tales como UC o UN.

2.4.2. *Obtención del tetrafluoruro de uranio*

La preparación industrial clásica del uranio metálico, a partir de uranatos, necesita las operaciones esenciales siguientes:

—disolución del uranato
—purificación
—elaboración de un nitrato transformado después en óxido
—reducción del óxido en metal o transformación del óxido en halogenuro, más cómodamente reductible.

Se debe notar que *todas las formas de empleo del U natural* exigen, prácticamente, pasar por *el estado de tetrafluoruro* UF_4 y que resulta más simple obtener la pureza nuclear buscada, por tratamiento químico previo, más bien que practicar al metal un afinado posterior, por ejemplo.

a) Disolución del uranato. El uranato es disuelto por ácido nítrico caliente. La solución, obtennida en cubas de acero inoxidable, contiene aproximadamente 350 g de uranio por litro.

b) Purificación. Es aquí donde se aplica la propiedad citada anteriormente para el nitrato de uranilo, de ser soluble en los solventes orgánicos oxigenados, de los cuales el más empleado es el T.B.P.

Una de sus ventajas es que el coeficiente de repartición del nitrato de uranilo, entre el T.B.P. y una solución acuosa, es muy favorable en ácido nítrico.

[1] Desde cierto punto de vista podríamos incluir esta parte en el parágrafo reservado a la obtención del uranio natural. Convendremos en colocar esta parte después de la elaboración en lingotes.

Al fin de la cadena se obtiene una solución orgánica que contiene el nitrato de uranilo, que se vuelve a pasar al agua por un tratamiento que utiliza agua pura.

De esta manera las pérdidas de T.B.P. por solubilidad en la fase acuosa son pequeñas.

El nitrato es entonces separado por precipitación (Francia, Gran Bretaña) y por evaporación (U.S.A.).

La pureza del nitrato de uranilo es muy grande.

No hablaremos aquí de los tipos de instalaciones empleadas: por mezcladores-decantadores, por columnas, simples o pulsadas, a circulación y extracción metódicas.

c) Obtención del óxido UO_3. El óxido UO_3 se obtiene, por ejemplo, a partir del nitrato de uranilo $UO_2(NO_3)_2$ por descomposición térmica según la reacción:

$$UO_2(NO_3)_2 \longrightarrow N_2O_5 + UO_3$$

operación realizada hasia los 500° C en hornos rotativos de acero inoxidable.

Hacia los 1.000° C, el óxido formado es U_3O_8.

d) Reducción del óxido UO_3. El óxido UO_3 no puede ser utilizado directamente por los metalurgistas con vistas a la obtención del metal; es necesario llevar el uranio a su valor 4.

Se tiene sucesivamente

$$3UO_3 \longrightarrow U_3O_8 + \tfrac{1}{2}O_2 \text{ hacia los 800° C, después:}$$

$$U_3O_8 + 2H_2 \longrightarrow 3UO_2 + H_2O$$

Esta última reacción es efectuada en hornos calentados a 800° C.

e) Preparación del metal. Obtención del tetrafluoruro de uranio. La preparación del metal es posible utilizando el dióxido, por reducción directa; sin embargo, la reducción en metal es más cómoda partiendo de un halogenuro de uranio.

Recordemos a propósito que la primera elaboración histórica del metal fue hecha en 1841 reduciendo el tetracloruro de uranio por potasio.

De los halogenuros, sólo los fluoruros de U son utilizados en escala industrial.

Un método muy utilizado es la fluoración directa de UO_2 por ácido fluorhídrico HF, anhidro, hacia los 450° C:

$$UO_2 + 4\ HF \longrightarrow UF_4 + 2H_2O$$

Debido a que *el ácido HF es excesivamente agresivo y peligroso*, se han intentado preparaciones indirectas utilizando al fin de la cadena un enrejado que permite llegar al tetrafluoruro.

Observación: Un equipo francés reciente, que aplica la técnica de hornos verticales, consiste en un horno combinado que efectúa la transformación directa del óxido UO_3 en tetrafluoruro UF_4.

NOTAS SOBRE LAS VIAS DE DESARROLLO DE LA CONCENTRACION QUIMICA DE MINERALES DE URANIO

a) Generalidades

Todas las fábricas químicas han sido prácticamente construidas en el período 1950-1952 a 1957-1958, en razón de la afluencia de necesidades de uranio hasta el fin de este período.

Este corto lapso ha impuesto la reproducción, en numerosos ejemplares, de fábricas, según las estructuras, puestas a punto inicialmente; la más corriente era el procedimiento por intercambio de iones (solventes o resinas) para obtener al fin de la cadena un uranato.

La reducción del volumen de fabricación, de lo cual ya se ha hablado, ha tenido por consecuencia, en la mayor parte de los productores, una tendencia hacia la disminución de las inversiones en el presupuesto de investigación, en el dominio de la química de extracción, conservando así la técnica hasta entonces aplicada. En cuanto a Francia, se ha orientado hacia un método abreviado que permite obtener, a partir de un concentrado tipo de uranato de magnesio [1], no un uranato sino una solución concentrada y muy pura de nitrato de uranilo.

Tal método ha representado una tentativa importante de modificación de las estructuras de las fábricas.

Si se observan ahora las diversas vías de concentración química,

[1] Obtenido por precipitación de soluciones de ataque.

aparece que ciertos países, no limitados en sus aspiraciones por instalaciones muy importantes ya existentes, han estudiado nuevas técnicas.

Citamos: Alemania, Argentina, Hungría, Japón y Yugoeslavia.

b) Han aparecido cuatro nuevos procedimientos posibles:

1º *Las posibilidades de lixiviación de minerales a granel:* riego por una solución acidulada, constantemente recirculada, de pilas de minerales colocados sobre áreas impermeables.

En Francia las explotaciones están actualmente en proyecto o en ejecución.

Han igualmente estudiado el problema:

Argentina, asociando este procedimiento a la fabricación de un preconcentrado cálcico.

Portugal, asociando este procedimiento a la utilización de una fábrica móvil [2] de intercambio de iones por resinas.

Este método será prácticamente interesante en el caso de semiestériles, o de yacimientos débiles aislados, para los cuales no sería económico instalar conjuntos de tratamientos completos.

2º *El preconcentrado cálcico:* fabricado a partir de soluciones de lixiviación por simple precipitación de la cal (procedimiento puesto en aplicación en FOREZ cf. *(a)*).

Este procedimiento es interesante para una fábrica alejada de toda otra industria.

3º *Purificación suplementaria después de las resinas y los solventes:* Alemania ha puesto en marcha un procedimiento que tiene por fin, después de la concentración y depuración, continuar la purificación hacia un grado de *pureza nuclear aceptable* y esto sin tener que precipitar el uranato de magnesio.

Entonces queda librado un *uranato de amonio* que tiene la pureza nuclear.

4º *La preparación directa del tetrafluoruro de amonio:* Tal método representaría una abreviación muy importante: la pureza nuclear sería obligatoriamente obtenida.

Numerosos estudios se están realizando en diferentes países.

[2] Instalaciones que aparecen interesantes para los yacimientos de pocas reservas.

c) *Aspecto económico*

Si, como se ha previsto, la demanda de uranio debe aumentar en los próximos decenios, es evidente que las nuevas fábricas necesarias podrán ser concebidas según los resultados de los procedimientos precedentes (o de otros procedimientos). De ello podrían resultar reducciones de inversiones y de gastos de explotación relativos a las fábricas químicas.

2.4.3. *Elaboración del metal en forma de lingotes*

A partir del tetrafluoruro así obtenido, se obtiene el uranio metálico reduciendo al UF_4 por *calcio* o *magnesio.*

Teóricamente serían posibles otros reductores, pero no son empleados por diversas razones, por ejemplo, el sodio: manipulación desagradable, tensión de vapor importante a la temperatura de reacción, de donde: disminución de rendimiento por volatilización.

a) *Reducción por calcio o calciotermia*

La reacción utilizada $UF_4 + 2Ca \longrightarrow 2F_2Ca + U + 135$ k cal, fácil, es brutal y fuertemente exotérmica (temperatura alcanzada: $\sim$ 1.500° C).

Procedimiento: El UF_4 es mezclado con el polvo o virutas de calcio (este último en exceso) y el conjunto es introducido en moldes de fluorina A a fin de evitar la contaminación (fig. 1).

El conjunto está contenido en un recinto con gas inerte (argon) B para evitar la oxidación del metal.

Después de la fusión el uranio, que funde a 1.132° C se reune en el lingote en un crisol C de fluorina pura.

b) *Reacción por magnesio*

Es el mismo tipo de reacción; el calor desprendido es 79 k cal. El Mg de pureza nuclear es menos caro que el Ca y es necesaria menos cantidad.

Aquí es preciso calentar para alcanzar el punto de fusión; además es necesario operar bajo presión para evitar la destilación del magnesio.

NOTA: Al ejemplo de los países anglosajones, Francia se orienta hacia el desarrollo de la magnesiotermia.

Una unidad piloto (300 t/año) funciona regularmente y se está extendiendo este procedimiento a toda la elaboración.

Los lingotes así producidos son de 100 a 1.000 kg, pero el tamaño más comúnmente fabricado es de aproximadamente 200 kg.

Todos los lingotes se preparan con las operaciones de refusión bajo vacío y de deformación por operacsiones mecánicas.

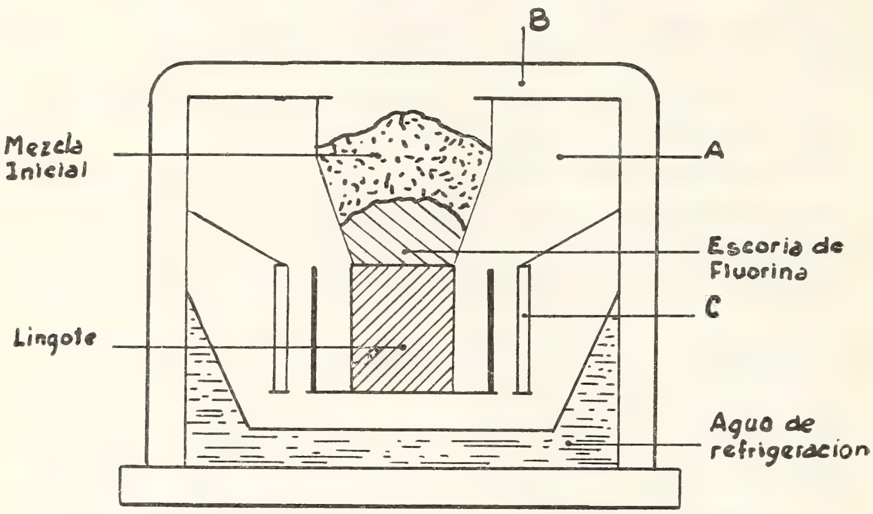


Figura 1

2.5. URANIO NATURAL EN POLVO

2.5.1. *Métodos de preparación del polvo de uranio*

Entre los diferentes procedimientos de preparación de polvos metálicos, cuyo empleo puede estar reservado, por ejemplo, *a la preparación de monocarburo UC* [1], sólo son usados para el uranio:

— la electrólisis (visto en 2.6);
— la reducción de una combinación metálica (hidruración);
— la desintegración por reacción química (calciotérmia).

Estos métodos conducen a polvos de propiedades muy diferentes, en razón del tamaño y forma de los granos:

[1] Ver parágrafo 6.

Polvos electrolíticos: estructura dendrítica, formas irregulares, de donde se pueden obtener cómodamente comprimidos robustos debido a la facilidad de empalme de los granos entre sí.

Polvos e hidruros: muy finos (orden del μ), granos de forma laminar. Esto da una gran reactividad química.

Polvos calciotérmicos: partículas seudo esféricas, que dan a los comprimidos fuerte densidad, pero son poco coherentes debido a la dificultad de empalme de los granos.

2.5.2. *Propiedades físico-químicas de los polvos metálicos*

Los parámetros principales que caracterizan un polvo metálico (y más generalmente un pulverulento cualquiera) son:

— el tamaño y forma de los granos;
— el espectro de tamaño de los granos o granulometría.

1º *Tamaño y forma de los granos:* El tamaño es un factor muy importante de la *piroforicidad* de los polvos metálicos, que es la capacidad de un polvo para inflamarse espontáneamente en el aire a la temperatura ambiente.

Esto se produce cuando esta temperatura es igual a la de inflamación del polvo.

La relación (superficie/volumen) se eleva, para una misma masa, a medida que una dimensión aumenta. Resulta de ello, siendo la intensidad de la reacción aproximadamente proporcional a la superficie de los granos, que un polvo en forma de agujas será más pirofórico que un polvo esférico y que un polvo laminar lo será más que los dos anteriores.

Cuanto más elevado sea el coeficiente de relleno, ligado a la forma de los granos, menos pasos habrá que eliminar durante la *compresión.* Se tendrá entonces mayor posibilidad de obtener un producto denso. Notemos, finalmente, que cuanto mayor sea la *superficie específica* [2] de un polvo (para un mismo tamaño o una misma forma de granos) será más fácil de tratar.

[2] Superficie real de los granos de la unidad de masa del polvo.

2º *Granulometría:* El espectro de los granos influye sobre:

— la piroforicidad;
— la reactividad;
— el coeficiente de relleno.

a) la piroforicidad de un polvo está condicionada a la piroforicidad de su fracción más fina;
b) si la temperatura de iniciación de una reacción química del polvo, del cual la piroforicidad es un ejemplo, depende de su fracción más fina, el grado de avance de la reacción alcanzada, al cabo de una duración dada, depende de la proporción de partículas gruesas;
c) las partículas finas aumentan el coeficiente de relleno de un polvo.

2.5.3. *Polvo de uranio preparado por descomposición del hidruro*

La reacción $U + 3/2\ H_2 \rightleftarrows UH_3$, sobre el uranio macizo, se hace con una gran variación de volumen; la densidad del hidruro es de 3,4 g/cm^3 contra 19 g/cm^3 para la del uranio.

De ello resulta que después del desarrollo del hidruro, debido a las elevadas tensiones entre las superficies, éste se despega cuando el espesor alcanza algunas decenas de micrones.

La extracción del hidrógeno se obtiene en el horno de hidruración en vacío y a la temperatura de aproximadamente 400° C.

El producto obtenido, muy pirofórico, encuentra, por este hecho, más empleo en el laboratorio que en el taller.

2.5.4. *Polvo de uranio calciotérmico*

Las etapas del proceso pueden ser las siguientes:

1) *Pastillado de reactivos.* Mezcla de óxido UO_2 y de calcio de alta pureza, comprimido en gruesas pastillas (∅ 80) para mejorar el rendimiento de la reacción y evitar la contaminación del uranio.
2) *Calciotermia propiamente dicha.* Reacción: $UO_2 + 2Ca \longrightarrow U + 2CaO$, compuestas bajo vacío y rellenados sucesivos con argon, se purgan los gases ocluídos en las pastillas.

   Cuando la mezcla está a 800° C se desencadena la reacción, acompañada de una brusca elevación de presión y temperatura.

3) *Separación del polvo de uranio.* Después de enfriado se obtiene un "bizcocho" de cal que contiene las partículas de uranio.

Por reacción con ácido acético, que no ataca al U, y después filtrando el licor y el polvo, se obtiene el polvo de U. Este debe ser enjuagado varias veces, cambiando el agua.

4) *Protección.* Se sumerje el polvo en una solución de sulfato de níquel[1] durante media hora. El uranio, una vez secado, no es más pirofórico y puede entonces ser manipulado cómodamente.

5) *Secado, tamizado y almacenado.* El polvo es secado bajo vacío y tamizado. En seguida es desgasificado bajo vacío elevado, el cual al cabo de 3 días es roto con argón. Esto reduce la oxidabilidad del polvo (posiblemente absorción de argón). El polvo es almacenado en cajas de 5 a 6 kg.

2.6. Uranio natural de muy alta pureza o uranio electrolítico

2.6.1. *Generalidades*

Pueden encararse tres métodos de preparación electrolítica con ánodo insoluble, esencialmente diferenciados por la naturaleza del solvente:

— electrólisis en solución acuosa;
— electrólisis en medios solventes orgánicos;
— electrólisis en baño de sales fundidas.

De estas tres técnicas sólo la última ha dado resultados satisfactorios.

Señalemos que, por el método en baño de sales fundidas, fue obtenido, en 1931 el primer uranio utilizable. El procedimiento utilizado ha sido explotado desde 1942 para producir la mayor parte del uranio (sin embargo, no muy puro) necesario para el "Manhattan District Project".

Un nuevo método, poco empleado en baños de sales fundidas, pero muy utilizado en medios acuosos, es el *electro-refinado.*

[1] La operación correspondiente no conduce a un niquelado. El mecanismo de la protección es bastante oscuro.

Consiste en tomar como ánodo no un elemento químico inerte como el grafito, sino el metal a deponer, bajo forma de *ánodo soluble.*

Acompañado de materias primas muy puras, en condiciones muy rigurosas para evitar toda clase de contaminación, este método (conducido a 400 - 450° C) permite actualmente producir uranio de pureza excepcional, destinado a estudios fundamentales de metalurgia.

2.6.2. *Nociones sobre electro-refinado*

De las condiciones experimentales citaremos principalmente:

Electrolito: UCl_3, KCl, LiCl.
Anodo: varillas de U a purificar.
Cátodo: varillas de molibdeno.
Atmósfera: argón puro.
Célula: recipiente de vidrio pirex o cuarzo.

Durante la electrólisis el uranio impuro se disocia en el baño, luego se reduce en el cátodo bajo forma de grandes cristales (dendritas).

Lo depositado, envuelto en sales, es, luego de la salida del cátodo, refrigerado bajo argón. Después de la refrigeración y luego extracción, se obtienen por diversos tratamientos las dendritas almacenadas en atmósfera de argón.

El metal se obtiene por fusión de esos cristales.

2.6.3. *Grado de pureza*

Luego de la fusión en crisol de UO_2 fritado a 1.200° C bajo vacío, la pureza del producto obtenido puede llegar a 99,993 % en peso, es decir, *0,007 % de impurezas totales.*

2.7. Estructura y comportamiento del uranio natural no sometido a radiaciones. Propiedades: físicas, mecánicas, metalúrgicas, térmicas:

En todo lo que sigue, el uranio natural será supuesto masivo, esto caracteriza, particularmente, el combustible utilizado en ciertos reactores heterogéneos.

El rol nuclear de este elemento es excepcional en la categoría de metales susceptibles de resistir a deformaciones de alta temperatura, tanto más que este metal presenta diversas estructuras cristalinas que definen estas limitaciones de empleo desde el punto de vista de la temperatura.

En efecto, durante la fisión, el calor se encuentra desarrollado en el seno del metal, y se trasmite por él, a través de una superficie de refrigeración, al medio refrigerante.

Esta fisión engendra un cierto número de fenómenos que influyen sobre las propiedades conocidas del uranio antes de la combustión, y ellas por la ausencia más que por cuerpos nuevos, donde ciertos gases se tornan nacientes.

Ello provoca, naturalmente, una cierta limitación de la duración de vida, tecnológica y nuclear.

Nosotros presentaremos las propiedades del uranio según que él esté o no en combustión (o en irradiación).

Las técnicas de puesta en condiciones serán expuestas en 2.7.6, mientras tanto nosotros precisaremos en los presentes párrafos aspectos de orden metalúrgico que condicionan estas técnicas.

Se nota que el parámetro temperatura es extremadamente importante, y lo encontraremos frecuentemente.

Según los casos, será particularmente precisado si se trata de uranio puro o en aleación.

2.7.1. *Generalidades*

El uranio de densidad próxima a 19, tiene sus características [1] variables en función de:

— el modo de fabricarlo (colado, laminado, trafilado) ;
— las impurezas (hidrógeno, carbono) ;
— los tratamientos térmicos (templado, recocido) y de fases cristalinas:

α: ortorrómbica (las más fácilmente encontrables)
β: tetragonal
γ: cúbica central, estable entre los siguientes intervalos de temperatura:

[1] El anexo 2.7.A reproduce en particular, bajo forma de tablas, las estructuras micrográficas del uranio obtenido siguiendo diversos métodos. Esas estructuras son igualmente expuestas en el presente texto.

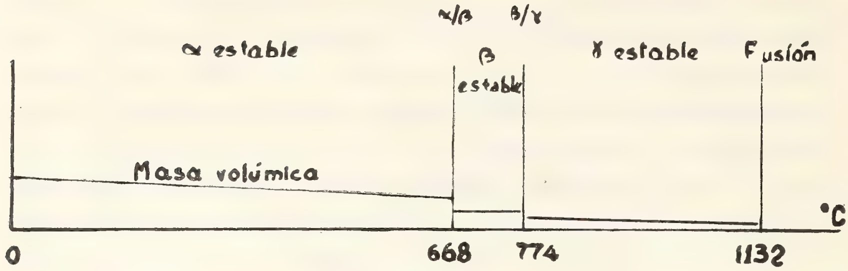


Figura 2

El uranio α es fuertemente anisótropo y denominado "*semiplástico*".

El uranio β es altamente *anisótico* y *muy frágil*.

El uranio γ, *isótropo*, presenta fuertes *propiedades plásticas* (ver anexo 2.7.A.).

Es de hacer notar particularmente que el uranio no tiene fase elástica.

La ley de Hoocke no se verifica nunca.

Para toda carga aplicada sobre el uranio, luego de la descarga, subsiste sobre él una deformación permanente.

Por convención nosotros diremos, pese a que ello nunca tiene sentido físico, límite elástico a x %. Utilizaremos igualmente los módulos de Young y los coeficientes de Poisson.

El pasaje entre las variantes cristalinas α, β, γ, se efectúan según mecanismos que no están aún identificados; no obstante, existe en todos los casos un hecho cierto:

Las propiedades, tales como: densidad, dilatación, conductibilidad térmica, resistividad, *dependen en buena parte de la "historia" de la muestra de uranio examinada.*

El conocimiento de los tratamientos aplicados a la probeta, con anterioridad a su examen, resulta indispensable para darles sentido y valor a todas las medidas que se realicen.

Dicho en otra forma las características no pueden ser interpretadas y utilizadas sin precisar su dominio de validez.

El anexo 2.7.B reproduce un cierto número de propiedades físicas, térmicas y eléctricas del uranio, en diferentes dominios (así el anexo 2.7.C hace referencia a los parámetros cristalinos).

De los tres estados α, β, γ, sólo α y γ son realmente explotados teniendo en cuenta sus aplicaciones.

Es importante destacar que por templado, el uranio β puro, como el γ, no pueden retenerse en el dominio de temperatura de α. Sin embargo, si el uranio está aleado, en pequeño porcentaje atómico, con cromo y con aluminio, la estructura β puede ser mantenida a la temperatura ordinaria, pero ella no es generalmente estable. En efecto, al menor choque o a la menor elevación de temperatura (de 90° a 300° C) esta estructura retorna a la estructura estable α.

La estructura del *agregado* γ *es isótropa;* el uranio es considerado entonces como participando del estado *más metálico*, retomando, por esto, las cualidades de los otros metales (alcalinos, vanadio, hierro).

Resulta así ventajoso retener la fase γ a la temperatura ordinaria o, por lo menos, a las temperaturas donde el metal no se oxide, sino muy lentamente.

Las tentativas realizadas para conservar, por temple, esta fase isótropa del uranio puro no han tenido aún éxito.

Esta estabilización no puede ser conseguida sin la ayuda de adiciones de ciertos elementos metálicos, por ejemplo, *la aleación de U*-Mo [1], donde el molibdeno puede estar presente en pequeño porcentaje en peso *(0,5 a 1,5, por ejemplo).*

Una tal fase podrá deformarse y trabajarse como un metal ordinario, según las mismas leyes.

El trafilado del uranio es frecuentemente efectuado en la fase γ, en razón de sus propiedades plásticas en este dominio.

Resulta, de lo precedente, que a las temperaturas del dominio α, siendo *esta estructura* la más frecuente, es, en todos los casos, *sólo posible para el uranio no aleado.*

Este aspecto será particularmente examinado.

Sabemos que la materia cristalina está caracterizada por propiedades que dependen de la dirección.

Bajo ciertas acciones, estas materias están sujetas a deformaciones y orientaciones preferenciales [2]. Ello conduce a examinar la textura interna del metal, es decir, la manera en que los diferentes cristales que la componen se disponen y orientan unos con respecto a otros.

[1] Ver parágrafo 2.8.7 (c).

[2] Orientación preferencial estadística de los granos, referidos a los ejes de simetría de deformación.

2.7.2. *Dominio α*:

a) Estructura cristalina

Esta estructura es fuertemente anisótica; el número de características físicas de esta fase varía en función de la orientación de los cristales.

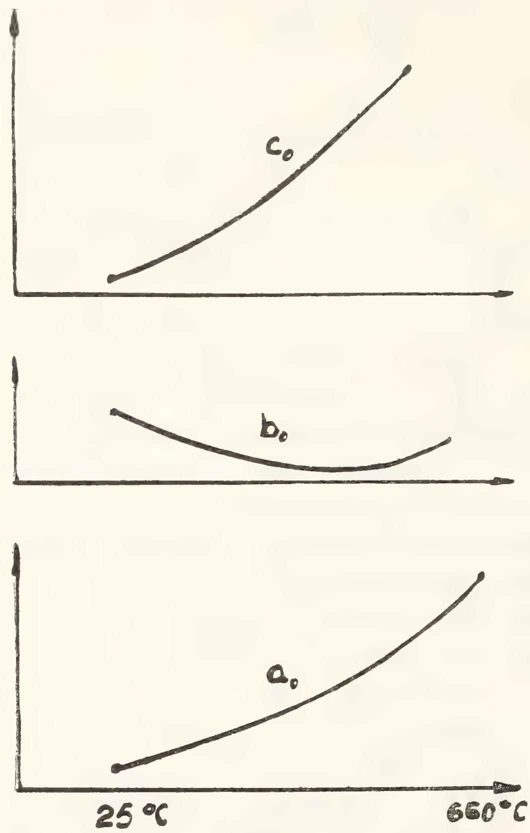


Figura 3

La figura 3 muestra la variación de los parámetros reticulares en función de la temperatura.

Los valores de los coeficientes de dilatación lineal variarán, a su vez, con la temperatura y la dirección cristalográfica.

Se destaca que b_0 presenta una variación negativa.

Una hipótesis consiste en suponer que ello es debido a la rotura de ciertas uniones covalentes entre átomos vecinos. Ello permite interpretar la contracción según el eje -b- como una contracción

de Poisson. En consecuencia, resulta que *las medidas de los coeficientes de dilatación lineal* no pueden ser efectuadas más que *sobre probetas monocristalinas*, suficientemente perfectas.

b) Agregado α. Características. Deformación. Orientación

b_1) Aspectos del agregado α:

La textura depende del modo de obtención del uranio:

— elaboración, torneado;
— trafilado en fases α o γ;
— laminado en fases α o γ;
— tratado térmicamente;
— recristalizado en fase α, después batido.

En el uranio molido los granos aparecen muy grandes, con los cortes muy variables, entre 30 y 1.500 μ, y donde la microdureza varía de uno a otro.

Un tal agregado no podrá comportarsee de manera homogénea en toda su masa, y necesita un *afinamiento del grano*, el que podrá ser realizado, por ejemplo, por:

— *refusión* bajo vacío, con desgasificación, y colado bajo forma de rodillos o de barras.
— Un *tratamiento* en frío adecuado (laminado, trafilado, martillado), seguido de un tratamiento térmico de recocido ($T < 660°$ C).

Se produce entonces una *recristalización*, es decir, un cambio completo de la estructura sin transformación de fase.

Para fijar las ideas, *laminando* una barra en pequeñas pasadas, tratada bajo vacío durante 2 horas a 575° C, obtenemos un grano medio de 12 μ, el que corresponde a un *agregado fino a granos sensiblemente iguales*.

La calidad de este agregado fino depende:

de una parte del coeficiente de reducción del lamilnado, de la temperatura de recristalización, de la conducción del tramiento térmico y del tenor de impurezas del uranio.

Por otra parte: de la estabilidad ulterior a los diferentes factores circunstanciales o permanentes, tales como: una elevación de temperatura en un tiempo dado y una eventual deformación.

A este respecto observamos que, a altas temperaturas, si la mayor parte de los granos crecen normalmente, con una velocidad muy moderada, principalmente en función de la temperatura, ciertos granos tienen tendencia al crecimiento exagerado y transforman a la materia en heterogénea.

Este último fenómeno sobreviene muy rápidamente si el metal es sometido a una deformación suplementaria de 1,2 a 1,8 %.

El examen de *barras trafiladas* lentamente en fase α entre 400° C y 660° C muestran una conformación comparable a la de las barras laminadas en los mismos dominios.

Esta noción de *velocidad de deformación* es importante: su influencia (cualquiera que sea la técnica de operación) se traduce por importantes variaciones estructurales.

Así, el metal trafilado a gran velocidad hace aparecer los granos muy gruesos, de aspecto poliédrico, a bordes recortados. El mismo metal trafilado a baja velocidad aparece con bandas completamente recristalizadas.

b_2) Propiedades. Mecanismos de deformación y de orientación preferenciales.

Es importante señalar que si podemos crear un aspecto micrográfico satisfactorio, si podemos mejorar y homogeneizar las propiedades mecánicas a partir del uranio a estructuras más o menos heterogéneas, la nueva estructura no es *estable sino por debajo de ciertas temperaturas, fijada por ejemplo en 550° C por seguridad y sin dirección preferencial*, comunicando a las masas metálicas propiedades *anisótropas* que se tienden a evitar por afinación del grano.

Plasticidad. La experiencia ha demostrado que el Uα no posee sino dos sistemas de deslizamiento [1]. Este es el caso de un metal que presenta pocos elementos de traslación que se prestan mal a una deformación general.

[1] Un metal debe poseer cinco modos independientes de deslizamiento para poder verificarse cualquier tipo de deformaciones.

Si nosotros deformamos un cristal metálico, en el sentido natural de sus caras, observamos en la superficie líneas paralelas (en el microscopio), que serán la interescción de una familia de planos que descomponen el cristal en secciones.

Se han realizado pruebas experimentales en que la deformación es bien localizada en los planos en cuestión, denominados *planos de deslizamiento*, y que las bajadas entre los planos no son nunca deformados.

Por deformación se considera, por debajo de 400° C, una importante generación de *Maclas* (basculación en block de pequeños volúmenes).

Por debajo de la temperatura de 400° C los fenómenos de deformación cambian fuertemente debido a que se presenta un fenómeno de *relajación de las juntas de granos.*

Nosotros hemos puesto efectivamente en evidencia que la generación de maclas cesa a 400° C o se produce esta relajación con pequeños coeficientes de deformación.

Si éstas resultan importantes o si las velocidades de deformación son muy elevadas, los fenómenos de relajación de juntas de granos no tienen tiempo de aflojar los encogimientos aplicados al conjunto y los fenómenos de maclado reaparecen.

El uranio α es de características *semiplásticas.* En grano grande, en un dominio de temperatura comprendido entre la temperatura ambiente y el punto de transformación $\alpha \rightleftarrows \beta$, *U* α *es plástico por debajo de 450° C, justo hasta el punto* $\alpha \rightleftarrows \beta$.

Debido a las diversas orientaciones de los granos, el derrame plástico puede considerarse no uniforme.

Según el coeficiente y la temperatura de deformación, las orientaciones preferenciales en los agregados policristalinos uniaxiales son más o menos complejos y acentuados.

Así, tienen una gran importancia sobre los *coeficientes de dilatación.*

Consideremos algunos resultados cualitativos sobre estas orientaciones:

— El agregado bruto de colada (o trafilado en fase γ) no presenta más que pequeña orientación preferencial, pero tiene el defecto de *microestructuras heterogéneas* a granos irregulares y gruesos (sin embargo, se habla de isótropos por compensación, debido a la gran dispersión de granos).

Una transformación mecánica de este agregado provoca, luego de un recocido bien definido, la aparición de una *fina microestructura homogénea y regular,* pero desarrolla una conformación neta que comunica a la masa *propiedades anisotrópicas.*

Después del tratamiento térmico en fase β, esta conformación desaparece en parte, así como la microestructura fina; ello se traduce por las *propiedades físicas isotrópicas,* pero los resultados de

las medidas físicas son muy dispersos para las muestras extraídas en la misma masa.

b_3) Propiedades mecánicas: Ver anexo 2.7.C citado.

2.7.3. *Dominio β*

Debido al hecho de la anisotropía elevada de la estructura β, el coeficiente de dilatación lineal es determinado sobre los monocristales de uranio β. Se ha determinado por relación a los parámetros cristalinos a_0 y C_0:

$$\bar{\alpha}_{a_0}\Big]_{20°C}^{720°C} = 23 \cdot 10^{-6}/°C \qquad \bar{\alpha}_{c_0}\Big]_{20°C}^{720°C} = 4.6 \cdot 10^{-6}/°C$$

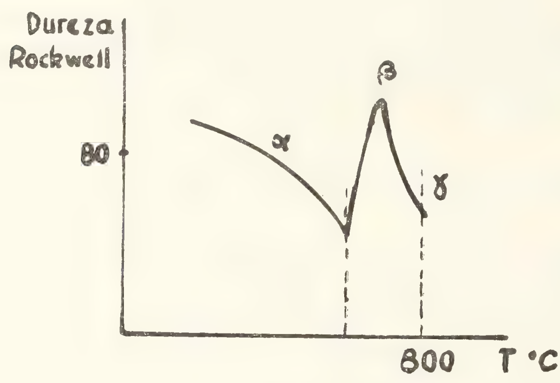


Figura 4

Luego el coeficiente de dilatación lineal medio de toda probeta policristalina variará fuertemente en función de las orientaciones preferenciales de los granos que forman el agregado.

En la zona de estabilidad β parece que el coeficiente se mantiene constante.

La dureza presenta un neto máximo, próximo a los 735° C, para disminuir casi totalmente en la proximidad del punto β ⇄ γ. No resulta de interés tecnológico retener el Uβ, en particular; esta estructura no posee sino un solo sistema de deslizamiento, resultando que si el cristal β está desfavorablemente orientado podrán aparecer fisuras en el material.

El uranio β, antiplástico, duro y frágil, presenta un límite elástico bien definido.

En funcionamiento, el uranio no debe nunca actuar en esta zona.

2.7.4. *Dominio* γ:

Aquí, como la fase es isótropa, el coeficiente de dilatación lineal, por relación a a_0 solo (cúbico), puede ser deducido mediante estudios dilatométricos sobre los agregados policristalinos de estructuras.

Se ha encontrado:

$$\bar{\alpha} = (22{,}6 \pm 1)_0 \; 10^{-6}/^\circ \mathrm{C} \text{ entre } 775 \text{ y } 800^\circ \mathrm{C}$$

La cualidad isotrópica del Uγ se utiliza, como ya se ha indicado, en el momento del hilado del uranio para la obtención de barras cilíndricas de gran longitud, a partir de rodillos obtenidos por fusión bajo vacío.

Por debajo de 780° C el metal resulta muy fofo y se deforma con gran facilidad; *su comportamiento es enteramente plástico* (R 795° C = 0,2 a 0,3 kg/mm^2, A = 33 %, Σ = 100 %).

Desde que esta fase es mantenida a la temperatura ordinaria, por aleación a *12 % de molibdeno en peso*, el módulo de Young a la temperatura ordinaria, toma el valor E = 10.000 kg/mm^2.

2.7.5. *Transformación al estado sólido. Elementos de adición. Características*

a) Hacemos notar solamente que los elementos que entran en solución sólida en una u otra fase, pueden perfectamente modificar la temperatura de transición, sobre todo su refrigeración.

Así, las *pequeñas concentraciones* de Al, Cr, Ru, Mn, Mo, Ni, Nb, Va, reducen las temperaturas de transformación $\gamma \rightarrow \beta$ y $\beta \rightarrow \alpha$; Ti y Zr reducen aquéllas de $\gamma \rightarrow \beta$ y elevan las de $\alpha \rightarrow \beta$. Se eleva solamente la transición $\gamma \rightarrow \beta$.

Transformación $\alpha \rightleftarrows \beta$: Hemos mostrado que la temperatura de transformación $\beta \rightarrow \alpha$ podrá ser disminuida a 250° C a lo máximo, por templado del U puro, a velocidades del orden de 8.000° C/s, sin que sea posible pensar en suprimir esta transformación.

Transformación $\beta \rightleftarrows \gamma$: Ningún estudio hasta ahora ha sido publicado respecto al carácter de la transformación alotrópica $\beta \rightleftarrows \gamma$ del uranio puro.

Los estudios de base son aquellos de las aleaciones de U-Mo; U-Nb o bien U-Ti; ellos permiten estimar a la estructura β como estructura transitoria.

b) La tabla siguiente muestra que sólo la *adición de molibdeno* mejora considerablemente las características mecánicas del metal U natural, contribuyendo así, con sus otras propiedades (ver en particular 2.8.7) a la estabilización del combustible.

Aleaciones	R (kg/mm²)	A %	Σ %	Dureza Vickers	Cargas que provocan un alargamiento del 25 % a 500°C luego de 500 horas, en kg/mm²
U de colada . .	45	5	9	205	2,75
U-Cr (0,1 %) tratado β	45	5	9	205	2,75
U-Al (0,4 %) de colada . . .	26	0,2	1	340	4,2
U-Mo (0,5 %) de colada . . .	88	5,8	6	230	3,5
U-Mo (1%) de colada	88	6,6	6,6	240	6,2

2.7.6. *Técnicas de puesta en condiciones del uranio:*

En base a la *fusión bajo vacío*, las técnicas de puesta en condiciones propiamente dichas del uranio son, esencialmente:

— el trefilado en fase γ o α;

— el laminado en fase γ o α;

— el martillado y el trefilado (estirado).

Las propiedades mecánicas se resumen en el anexo 2.7.B citado anteriormente.

a) Fusión bajo vacío:

a_1) El vacío es necesario para:

— evitar la contaminación (ver reactividad química) ;

— favorecer la evacuación de gases ocluidos en el metal elaborado a partir de UF_4, por calcio o magnesiotermia (algunos cm³ de gas ocluido, hidrógeno en particular por 100 gr de metal).

Ello se traduce en una mejora en la calidad del metal.

La operación de fusión permite realizar las adiciones deseadas en el metal, de manera de obtener un producto homogéneo.

En el caso en que los productos deban ser fuertemente aleados y se deba agregar metales cuyo punto de fusión difiera sensiblemente de aquel del metal de base, es la técnica del horno a electrodo consumible el que da los mejores resultados.

La forma general obtenida de los lingotes es circular.

Si uno desea *productos de una gran precisión*, el moldeo a continuación de la fusión permite la obtención directa de la forma deseada:

— redonda
— plana
— tubular, etc.

Es importante señalar que la principal dificultad encontrada en la colada de tubos [1] (muy utilizada en los reactores U.C.gas) es la obtención de un metal sano, exento de sopladura, susceptible de afectar su mantenimiento en el reactor, el espesor de la corona puede ser del orden de los 10 mm.

a_2) A título de ejemplo, se pueden obtener por fusión en vacío elementos de un peso máximo de 150 kg.

Un dispositivo posible comprende:

— un recinto de baja presión con dispositivo de bombeo;
— el recinto del horno, del crisol, de los moldes y las lingoteras;
— el dispositivo de calentamiento de mediana frecuencia.

La experiencia ha demostrado la ventaja de emplear el acero inoxidable para las canalizaciones, las campanas y las bridas, desde el punto de vista del tiempo de reducción de la presión luego de pérdidas de aire (luego de reparación, por ejemplo).

Los moldes son de acero o de grafito.

Para el uranio natural, no aleado, el límite de desgasificación es del orden de 20 minutos a 1.450° C; la presión es entonces inferior a 10^{-4} mm de Hg.

[1] Un párrafo a fin de (a) tratará más especialmente de estas formas para las cuales algunas indicaciones serán dadas cuando se hable de la máquina, soldadura, controles.

a_3) Nota sobre la radioactividad β

Si nos referimos al anexo 1 B, se ve que ciertas β emitidas naturalmente en la cadena del U 238 tienen una energía elevada, en particular aquellas del isótopo activo del torio.

Ordinariamente, los β son autoabsorbidos en la masa.

En el caso donde se calienta el uranio a temperaturas elevadas o cuando se refrigera la fusión, el torio activo tiende a fijarse en superficie. Ello da como consecuencia una actividad superficial β creciente, susceptible de pasar los límites de tolerancia para la manipulación directa.

a_4) Tubos

Una precaución tomada para la obtención sin sopladuras es el *precalentamiento* de los moldes de grafito, permitiendo bajo ciertas condiciones una solidificación dirigida de abajo hacia arriba (colada por gravedad) por planos paralelos.

Esta operación debe ser seguida [1] *de un tratamiento térmico de refrigeración controlada*, teniendo por motivo, en particular, obtener una microestructura de granos finos perfectamente homogénea sobre todo el largo del tubo. Se trata de efectuar este tratamiento en el montaje mismo del horno de colada.

La *maquinación* de los tubos (y de las pastillas de cierre) es más delicada y precisa que el de las barras. Las operaciones correspondientes son automatizadas al máximo, lo que se hace en excelentes condiciones.

La *soldadura* en las extremidades de las pastillas sobre los tubos de uranio aleado debe ser *estanca*. Se efectúa por resistencia y de tal manera que las heterogeneidades estructurales residuales son las más bajas posibles.

Luego del maquinado final y decapado por arenado, los tubos sufren un *tratamiento de distención y de desgasificación bajo vacío* de la superficie del metal para permitir, luego del envainado, un mejor contacto entre vaina y uranio.

Los *controles* se efectúan sobre los porcentajes de los elementos adicionados y *las impurezas por gamagrafía, sobre la microestructura, sobre el aspecto y las dimensiones.*

[1] La solidificación es lenta en la cabeza de los tubos y rápida en el pie; en el caso de la aleación con 1,1 % de bolibdeno, el tamaño del grano γ y el del grano α se acrecienta en la cabeza.

b) Trafilado en fase γ bajo grafito

Teniendo en cuenta la facilidad de oxidación y el riesgo de formación de un eutéctico U-Fe a 725° C, ha sido necesario poner a punto un método de trafilado en tres etapas, *bajo atmósfera controlada:*

— calentamiento a 950° C del *rodillo*, protegido por grafito y rodeado por una camisa de acero inoxidable a la temperatura de 950° C y bajo atmósfera de argón;

— un trafilado de rodillo en el interior de su camisa protectora en la prensa, con recepción de la barra trafilada en un tubo refrigerante lleno de argón;

— un enfriamiento dentro de este último.

Los rodillos provienen de la fusión bajo vacío.

La descarbonización de la rama es evitada recubriendo su superficie con una capa de grafito coloidal.

Se puede, con ciertas modificaciones, trafilar los *tubos* a partir de un material hueco. La excentricidad final es pequeña y las superficies son tan buenas como las de las barras trafiladas.

Características del metal trafilado en fase γ

Grano heterogéneo, 5 a 500 μ; no hay orientación que caracterice al metal.

Dispersión de las *características mecánicas. Estas no difieren prácticamente de las del uranio fundido bajo vacío y moldeado,* o de un metal que ha sufrido una transformación cualquiera y tratado térmicamente en fase γ luego de esta operación.

La ruptura es frágil y se produce en un punto cualquiera de la probeta.

Luego del ensayo de fatiga térmica efectuado por *ciclos térmicos* [1] entre 20 y 520° C, el metal se deforma, acusando flechas locales importantes y la superficie toma el aspecto característico de "*piel de naranja*".

Del punto de vista fluencia, los esfuerzos que provocan la ruptura decrecen lentamente en el tiempo comprendido entre 1 y 1.000 horas.

[1] Ver párrafo 2.7.7.

A pesar del precio relativamente bajo del trafilado, *el precio de la fabricación es en total netamente más elevado que el del uranio fundido bajo vacío, que queda así como el método más económico.*

c) Trafilado en fase α bajo prensa rápida

Para una velocidad de alimentación de 10 m/minuto, el producto trafiflado puede salir a una velocidad de 200 m/minuto.

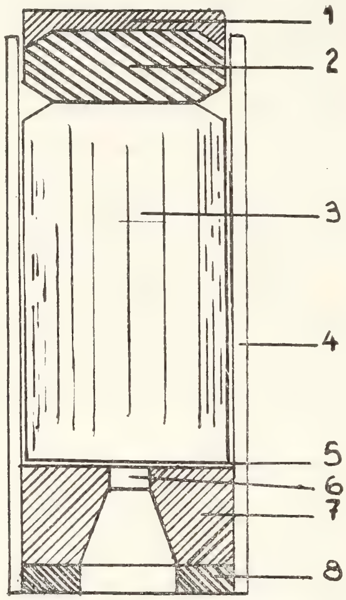


Fig. 5. — *Referencias* : 1, cubertura ; 2, carburo de tungsteno ; 3, rodillo; 4, camisa; 5, junta ; 6, tetón de centrado ; 7, carburo de tungsteno ; 8, arandela de acero

El calentamiento del rodillo se hace en un baño de sal (550 a 560° C).

La lubricación es así asegurada.

El rodillo está bañado de sal (Cl Ba y Cl Na) que, aún líquidos, sirven de adherente y permiten que una cierta cantidad de polvo de vidrio se adhiera a la superficie lateral del rodillo, lo que asegura su lubricación.

Los estados de superficie de U son menos concluyentes que para el acero.

d) Trafilado en fase α bajo prensa lenta

El calentamiento del rodillo se hace en un horno a argón hasta 600° C. Este rodillo es cilindro-cónico.

La lubricación está asegurada debido a la ayuda de panes de resina grafitada.

Se obtiene un buen estado de superficie.

e) Características del trafilado

Las características, dentro del dominio plástico, que caracterizan el trafilado son principalmente:

— el esfuerzo de trafilado (con o sin frotamiento) ;
— la velocidad de deformación;
— la cantidad de calor desprendida en el lugar.

La importancia de la deformación se designa a menudo por:

A % $= 100\ [(S_0/S_1) - 1]$, siendo el alargamiento verdadero:
$A_v = \text{Log}\ S_0/S_1$, de donde la importancia del factor S_0/S_1.

Se considera también el valor A %/Δt, donde Δt es el tiempo de trafilado.

Por utilización de la ecuación de Clapeyron y por ejemplo en trafilado rápido:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{1}{T}\frac{L \cdot J}{U\alpha - U'\beta}$$

donde p: presión

T: temperatura absoluta = 441° K
L: calor de transformación = 2,84 cal/kg
$U\alpha$: volumen de la masa de $U\alpha = 0{,}0537\ cm^3/g$
$U'\beta$: volumen de la masa de $U\beta = 0{,}0544\ cm^3/g$

Se obtiene $dp/dT = 1{,}84\ kg/mm^2/d°\ K$. Para una presión media de $72\ kg/mm^2$ se tiene T = 39° C, de donde la temperatura de transformación resulta 668 + 39 = *707° C.*

La temperatura final obtenida puede ser superior en muchas decenas de grados.

f) Laminado en fase α

El laminado en α es corrientemente utilizado:

— en alto de la fase α si uno espera fuertes deformaciones;

— debajo de la fase α si uno desea tolerancia de laminado más pequeñas o textura determinada.

El laminado se efectúa *bajo vaina de cobre bajo vacío,* lo que permite obtener un metal particularmente limpio y sin óxido (los restos de cobre se quitan fácilmente).

Las barras laminadas en fase α presentan orientaciones preferenciales que determinan el valor de la temperatura dentro de la que el laminado es efectuado.

g) Laminado en fase γ

Este laminado se hace bajo vaina donde el metal debe ser elegido para no formar compuestos intermetálicos con U, tal como el Cu, a temperaturas inferiores a 950° C.

Es necesario, teniendo en cuenta la plasticidad del U, deformarlo en fase γ bajo vaina muy espesa, que le imponga al uranio su modo de deformación.

La textura del metal así laminado y enfriado lentamente es la textura característica del uranio fundido o trafilado en fase γ.

h) Forjado y trafilado del uranio

Estos métodos permiten obtener productos redondos.

El *forjado* rotativo es efectuado en caliente sobre diámetros del orden de 30 mm, y en frío para diámetros inferiores a 10 mm.

El forjado en caliente es realizado en alto de la fase α con vaina de cobre, que se destruye en general luego de la reducción de la sección de 25 a 50 %;

— a temperaturas superiores a 450° C se tiene una deformación por deslizamiento;

— a temperaturas inferiores a 300° C se tiene sobre todo una deformación por fluencia.

El estirado permite obtener hilos de varios céntimos de mm.

2.7.7. *Fatiga térmica*

Es muy importante llegar a conocer los efectos y el mecanismo de la fatiga térmica por las siguientes razones:

— bajo forma de barras el uranio, dentro de un reactor, está sometido a un gradiente de temperatura entre su centro y su superficie;
— esta temperatura varía fuertemente en el arranque y la detención de la pila o cada vez que el nivel de potencia es modificado;
— las irradiaciones y las fisiones ocasionan en el metal efectos microscópicos similares a aquellos de la fatiga térmica.

a) Factores de la fatiga térmica y efectos

Primera serie, provenientes de las características propias de los ciclos térmicos:

Factores f_e:
- Temperatura límite
- Variación de temperatura
- Velocidad de calentamiento
- Velocidad de enfriamiento
- Tiempo de la etapa

Segunda serie, factores ligados intrínsecamente al material:

Factores f_i:
- Dimensiones y homogeneidad de los granos
- Orientación preferencial
- Composición química

Manteniendo constantes las f_e [1] se han constatado experimentalmente los *efectos siguientes:*

a_1) — *El metal puro bruto de colada o trafiflado en fase* γ, con agregado policristalino heterogéneo y grosero, forma en su superficie una "piel de naranja", tanto más rugosa cuanto más grandes sean los granos;
— prácticamente *no hay alargamientos unidireccionales* macroscópicos a pesar de que las contracciones térmicas acusan un calentamiento más o menos acentuado;

[1] Los ciclos térmicos adoptados pueden ser, por ejemplo, los de la figura 6.

— a medida que el número de ciclos aumenta, la microestructura se modifica cada vez más;
— poligonización [1] acentuada;
— deformación intergranular;
— aumento de la porosidad y en consecuencia disminución de la densidad.

a_2) El metal puro, transformado por *deformación plástica en frío o en caliente* y después tratado térmicamente en fase α, con agregado policristalino homogéneo, conserva con los ciclos térmicos una superficie *tanto más lisa* cuanto más finos sean los granos.

Por el contrario, se produce un *alargamiento unidireccional* tanto más importante cuando los granos son más finos y la orientación preferencial, de un cierto tipo, es más marcada.

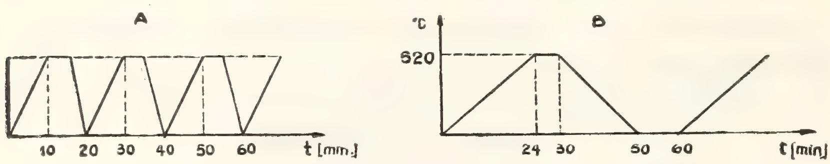


Fig. 6. — A : sobre pequeña muestra ; B : sobre elemento en tamaño natural

El coeficiente de dilatación térmica a temperatura ordinaria no varía luego de estos ciclos, lo que indica que la fatiga térmica en fase α no modifica prácticamente la orientación preferencial.

a_3) *Un tratamiento en fase β sobre el metal puro recristalizado suprime, casi enteramente, su orientación preferencial (el mismo coeficiente de dilatación en las tres direcciones)* y disminuye el alargamiento a la fatiga térmica, y esto es tanto mejor si se efectúa un tratamiento rápido en fase β, seguido de un templado, para impedir un engrosamiento muy heterogéneo de los granos β.

b) Mecanismos propuestos

Muchos esquemas de explicación de las causas de los efectos precedentes han sido propuestos, pero aparentemente, al fin, sobre la teoría de deformación por ciclos térmicos resta aún mucho por hacer.

[1] Por microscopía óptica se pueden distinguir en el interior de los cristales de metal contornos menos marcados que las uniones de granos y que serán dos regímenes de orientación ligeramente diferentes.

c) Conclusión

Del hecho que las formas α y β son física y metalúrgicamente muy diferentes, el pasaje $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ *comprenderán, si esto se produce, deformaciones en el uranio natural, suficientes para deteriorar este elemento combustible.*

2.8. El uranio natural bajo irradiación

2.8.1. *Generalidades*

a) Durante el funcionamiento de un reactor, el uranio metal es el asiento de un gran número de efectos.

Durante su estadía en la pila y antes que su combustión sea completa, el combustible se deteriora poco a poco por diversas razones, como:

- — los desgastes causados por los productos de fisión;
- — los desgastes causados por los rayos (γ, r, rápidos, etc.) ;
- — efecto de los ciclos y gradientes térmicos.

Resulta en consecuencia (en el caso de los reactores a uranio natural con grafito-gas, por ejemplo) una limitación de su estadía en la pila; los elementos combustibles irradiados deben ser extraídos al fin de un cierto tiempo, que puede ser llamado *duración de vida tecnológica.*

b) Durante esta misma estadía varía la composición del combustible [1].

Destrucción y formación de núcleos físiles (U 235, Pu 234, Pu 241) o fértiles (Pu 238, Pu 240).

Formación de venenos (U 236, Pu 242, productos de fisión).

Esto entraña una modificación progresiva de las propiedades nucleares del material, que se produce antes o después, por un efecto desfavorable sobre el balance de neutrones en la pila.

Paralelamente a la duración de vida tecnológica, se tiene una *duración de vida nuclear.*

Se representa a menudo la duración de vida teórica de un combustible por la energía total que uno le puede extraer por unidad en masa (normalmente en MWd/t).

[1] Puede remitirse al anexo 1 A del capítulo sobre los combustibles irradiados en lo concerniente al esquema de las reacciones (para U y Th).

Es de notar que los productos de fisión van del zinc (Z = 30) al gadolio (Z = 64), lo que anuncia para el tratamiento de los combustibles irradiados una química compleja.

Entre los productos de fisión se encuentran dos gases raros, esencialmente el *Xenón* y el *Krypton*, que representan del 10 al 15 % de los productos de fisión.

Los fenómenos de difusión y de estancamiento, bajo forma de burbujas, que se agregan, son extremadamente importantes.

c) Los efectos tecnológicos más marcados son:

— la pérdida de la ductilidad propia;
— *el crecimiento* (a volumen constante, de los coeficientes de dilatación de U en las diferentes direcciones cristalográficas).
— *el inflamiento* (disminución de la densidad aparente) ;
— la desintegración del agregado cristalino Xe y Kr son el origen del *inflamiento.*

Los principales parámetros que producen los efectos dependen:

— del flujo de neutrones térmicos;
— de la concentración en átomos del U 235;
— de las constantes a las que está sometido el metal llevado a la temperatura de su utilización.

2.8.2. *Modificaciones del arreglo atómico*

A la escala de la red cristalina, el balance de una fisión de un átomo de U 235 se traduce por los fenómenos siguientes:

a) desaparición de un átomo de U 235;
b) proyección sobre unos diez micrones de fragmentos de fisión debido a una fuerte energía cinética, desplazándose de su posición de equilibrio de los átomos, creando así *átomos en posiciones intersticiales y lagunas* (pares de defectos) ;
c) choque de neutrones rápidos con los átomos de la red que se desplazan, una parte de ellos, fuera de su posición de equilibrio;
d) ionización intensa causada por la circulación de fragmentos de fisión y de rayos β y γ.
e) concentración alrededor de puntos singulares de átomos gaseosos de fisión Xe y Kr, con formación de poros.

2.8.3. *Modificaciones microestructurales*

A elevados valores de combustión [1], los granos de uranio inicial policristalino, no pueden ser discernidos micrográficamente.

La estructura en un estado fuertemente irradiado se parece a la del estado martillado del uranio no irradiado.

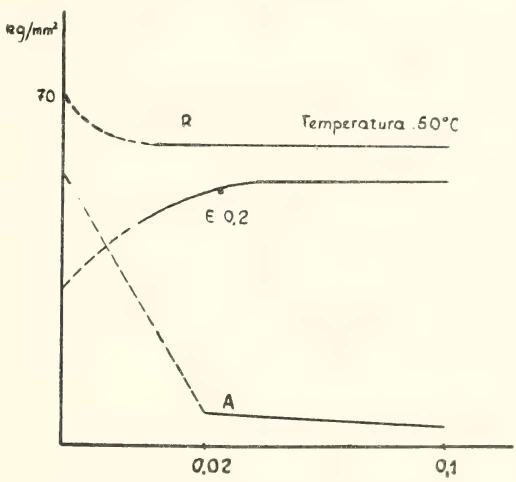
Los análisis han confirmado la hipótesis de la influencia preponderante de los átomos de productos de fisión.

Notemos que dentro de ciertas condiciones de tiempo y temperatura un recocido puede provocar la restauración sin que por ello se puedan restablecer las características mecánicas iniciales.

Fisuras y precipitaciones intergranulares se forman a partir de bajos valores de combustión, en función de esto último.

2.8.4. *Modificaciones de las propiedades mecánicas*

Se ha buscado la influencia de valores de combustión y de temperatura de irradiación sobre las características del uranio irradiado.



Valores de combustión en % de átomos 235

Fig. 7. — Ruptura R y límite elástico E = 0,2 kg/m² y alargamiento A en %

[1] Combustión másica o "burn-up" al nivel de irradiación, expresada en MWd/t. Recordemos que a la fisión completa de 1 gr de U235 corresponde aproximadamente la energía de 1MWd liberada.

Esta relación puede traducirse por la expresión siguiente en % de tasa de combustión:

0,1 % (combustión) de isótopo U235 consume 1000 MWd/t

o sea

1 p.p.m. U235 1 MWd/t

Para T = 50° C, las alteraciones son muy importantes hasta un valor de 0,02 %.

Se puede demostrar que por debajo de 600° C la restauración es rápida, a condición de calentar lentamente, porque si no las contracciones térmicas reducidas serán suficientes para provocar la propagación de fisuras que se extienden formadas según el valor de la combustión.

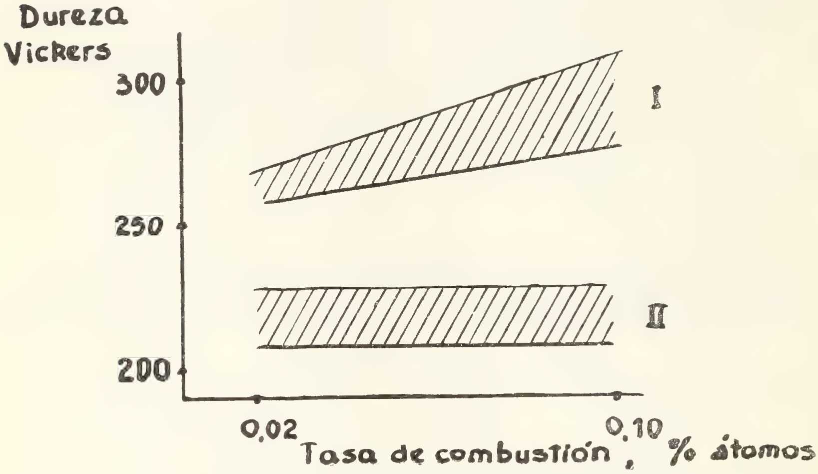


Fig. 8. — *Referencias :* I, luego de irradiación ; II, antes de irradiación

Luego que el uranio es irradiado a temperaturas más elevadas, se constata igualmente una disminución de R y E ; no hay ninguna mejora de la ductilidad con relación a la del uranio irradiado a la temperatura ordinaria (fig. 7). La dureza sufre variaciones apreciables durante la irradiación (fig. 8).

2.8.5. *Modificación de la resistividad eléctrica*

El estudio de las variaciones de la resistividad eléctrica es, en particular, de mucha importancia para la interpretación teórica de las alteraciones bajo irradiación. El estudio de los *defectos puntuales* necesita un uranio de muy alta pureza, en el que la verificación pueda ser hecha a partir de la temperatura de recristalización o de la resistividad a muy baja temperatura (algunos grados K).

[1] Una dislocación es una imperfección, lineal o no, que limita en un metal una región que se ha deslizado con respecto al resto del cristal.

Nota: Al lado del estudio de defectos puntuales (lagunas, intersticios) por intermedio de la resistividad, se pueden estudiar las dislocaciones [1] desde la transmisión en un microscopio electrónico.

2.8.6. *Crecimiento del uranio bajo irradiación*

El crecimiento del uranio puede ser estudiado por las irradiaciones de *corta duración,* lo que permite evitar el manipuleo de las muestras muy radioactivas y al mismo tiempo esperar entender mejor los mecanismos elementales de la aparición de fallas.

El crecimiento, o cambio de la forma durante la irradiación, a volumen constante, proviene de gran número de intersticios y lagunas creadas por el pasaje de fragmentos de fisión.

Es muy importante, desde el punto de vista de sus efectos, observar que los mismos, *bajo irradiación,* son cualitativa y cuantitativamente diferentes, según si se trata de un agregado con granos gruesos o finos, presentando o no orientaciones preferenciales.

Agregados a granos gruesos y desorientados (uranio fundido o estirardo en fase γ).

Se manifiesta en general:

- deformaciones de superficie *(cáscara de naranja);*
- *Distorsiones de volumen* (flechas, curvaturas, etc.) ;
- modificaciones estructurales (véase 2.8.3).

Agregados a granos finos y orientados preferencialmente (uranio en barras forjadas y recristalizado).

Estos soportan:

- *variaciones unidireccionales sin deformación de superficie.*

Caso de monocristal (en fase α):

- se alarga según la dirección (0.10) ;
- se contrae según la dirección (0.01) ;
- las variaciones de longitud de (001) son aparentemente despreciables.

Ciertas experiencias han demostrado que la *velocidad del crecimiento* depende de la temperatura del cristal: despreciable para $T \leq 100°$ C; crece hasta 200° C; decrece hasta 400° C, adonde ella

tiende hacia 0 para no manifestarse más hasta alrededor de 525° C (excepción hecha cuando la velocidad de fisión es elevada).

Se ha verificado en el curso de este crecimiento que ni el volumen del cristal, ni su estructura ortorrómbica, ni sus parámetros cristalinos fueron sensiblemente modificados.

La velocidad del crecimiento depende, además, de la temperatura:

— de la orientación preferencial;
— del tamaño de los granos;
— de la tasa de combustión.

Observaciones:

1. Fue establecido que la velocidad del crecimiento fue dos veces más rápida para un agregado policristalino a granos finos, de textura de fibra, que para un monocristal.
2. Se ha observado que las contracciones internas desarrolladas durante el curso del crecimiento podían influir sobre el nacimiento de un fenómeno de fluencia.
3. *Se intenta combatir el crecimiento anisotrópico produciendo un uranio a granos finos y con una orientación preferencial mínima (si es posible sin orientación).*

En primera aproximación, es éste el caso de las aleaciones U-Mo, donde U está poco aleado y tratado.

(Continuará)

Correo Argentino Central « B »
Franqueo pagado
Concesión Nº 1186
Tarifa reducida
Concesión Nº 6247

Las importantes obras que SEGBA permanentemente debe realizar, demandan una cuidadosa programación y trabajos a largo plazo, además de una ayuda financiera indispensable. Sólo con ella podrá SEGBA lograr el objetivo que es su permanente preocupación: Brindar un eficiente servicio a toda su clientela.

